

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robototechniky

Haptické zařízení pro ovládání
manipulačního ramene robotu

Haptic Device for Control
of Manipulating Arm of Robot

Student: Tomáš Chamrad
Vedoucí bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Chamrad

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2301R013 Robotika

Téma:

Haptické zařízení pro ovládání manipulačního ramene robotu
Haptic Device for Control of Manipulating Arm of Robot

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rešerši dostupných haptických zařízení pro ovládání manipulačních ramen s různým počtem stupňů volnosti.
2. Specifikujte požadavky na kinematickou strukturu haptického ovladače a jeho technické vybavení pro stávající hasící a zásahový robot Hardy.
3. Proved'te rešerši vhodných snímačů haptického ovladače včetně HW pro zpracování signálů ze snímačů.
4. Vypracujte technické a konstrukční řešení haptického zařízení včetně výkresové dokumentace.

Seznam doporučené odborné literatury:

URL: <http://www.sensable.com/hapticdevices-projects-papers.htm> [cit. 10.12.2010]

SKAŘUPA, J. – MOSTÝN, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.

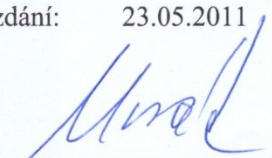
KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 144 s. ISBN 80-248-0626-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

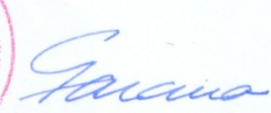
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr.Ing. Vladimír Mostýn**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011


prof. Dr.Ing. Petr Novák
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....
podpis studenta

Plné jméno autora práce:

Tomáš Chamrad

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Petřvaldská 1571, Šenov, 739 34

Česká Republika

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CHAMRAD, T. *Haptické zařízení pro ovládání manipulačního ramene robotu: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2011, 70 s. Vedoucí práce: Mostýn, V.

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí ovladače manipulačního ramene mobilního robotu Hardy. V úvodu je provedena rešerše dostupných haptických zařízení a následně specifikovány požadavky na samotný ovladač. Dále byly vyhledány vhodné snímače a hardware pro přenos jejich signálu. Z uvedených poznatků vycházely tři navrhované varianty, z nichž byla pomocí hodnotové analýzy vybrána optimální varianta. Tato varianta byla následně konstrukčně rozpracována do podoby mobilního ovládacího batohu. Při návrhu byla velká pozornost věnována rovněž průchodu kabeláže systémem a jeho designu. Na závěr byly vybrány vhodné pružiny vyvažovacího ústrojí ovladače a provedena pevnostní analýza plastového krytu ovladače. Sestavné výkresy batohu a ovladače manipulačního ramene jsou uvedeny v příloze bakalářské práce.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

CHAMRAD, T. *Haptic Device for Control of Manipulating Arm of Robot: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2011, 70 p. Thesis head: Mostýn, V.

Bachelor thesis deals with construction of control mechanism of mobile robot Hardy. The introduction contains a search for available haptic systems. Controller's requirements were also specified. In the next part, optimal sensors and hardware for its signal transmission were selected. Based on the findings, three versions of controller were designed. Value analysis was used to determine the optimal version, which was developed into the mobile control pack. Special attention was paid to cable path design and overall design. In the last part, appropriate springs of the balance apparatus were selected and stress analysis was applied to a plastic cover of the mechanism. Assembly drawings of the mobile pack and the manipulating arm are available in the appendix.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Vladimíru Mostýnovi za cenné rady a připomínky a všem zaměstnancům katedry za ochotný a obětavý přístup během bakalářského studia.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	9
Úvod	10
1 Rešerše dostupných haptických zařízení	11
1.1 Haptické systémy se třemi stupni volnosti	11
1.2 Haptické systémy se čtyřmi stupni volnosti	13
1.3 Haptické systémy s pěti stupni volnosti	13
1.4 Haptické systémy s šesti stupni volnosti	14
1.5 Haptické systémy se sedmi stupni volnosti	19
2 Požadavky na konstrukční provedení ovladače	21
2.1 Robot Hardy	21
2.2 Požadavky na kinematickou strukturu a konstrukci ovladače robotu	22
2.3 Požadavky na technické vybavení ovladače	22
3 Přehled vhodných snímačů ovladače robotu	22
3.1 Potenciometry	22
3.2 Optické enkodéry	23
3.2.1 Absolutní enkodéry	24
3.2.2 Inkrementální enkodéry	24
3.3 Magnetické snímače	25
3.3.1 Magnetický absolutní snímač	25
3.3.2 Magnetický inkrementální snímač	26
3.3.3 Magnetický induktivní snímač	26
3.4 Výběr vhodného snímače pro ovladač robotu Hardy	27
4 Hardware pro zpracování signálu ze snímačů	28
4.1 Převodníky ze sběrnice RS 485	28
4.2 Převodníky z analogového signálu	30
4.3 Výběr vhodného převodníku pro ovladač robotu Hardy	31
5 Varianty řešení	31
5.1 Koncepce ovladače	31
5.2 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu - varianta 1	32
5.3 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu - varianta 2	34
5.4 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu - varianta 3	35

6	Výběr optimální varianty	37
6.1	Stanovení kritérií	37
6.2	Stanovení váhy významnosti jednotlivých kritérií	37
6.3	Stanovení optimální varianty pomocí zvolených kritérií	39
6.4	Závěr hodnotové analýzy	39
7	Popis optimální varianty	40
7.1	Mobilní ovládací batoh	40
7.2	Ovládací rameno s joystickem	41
7.3	Rameno s ovladačem manipulačního ramene robotu Hardy	42
7.3.1	Kloub 1	42
7.3.2	Kloub 2	43
7.3.3	Kloub 3	44
7.3.4	Kloub 4	45
7.3.5	Kloub 5	45
7.3.6	Rukojeť	46
7.3.7	Vedení kabelů ovladačem	47
7.4	Design ovladače	48
8	Dimenzování a výběr tažných a tlačných pružin	49
8.1	Kloub 1	49
8.2	Kloub 2	50
8.3	Kloub 3	54
8.4	Kloub 4	58
8.5	Kloub 5	60
9	Pevnostní analýza prototypu plastového krytu	62
9.1	Analyzovaná součást	62
9.2	Síť	63
9.3	Definice	64
9.4	Analýzy	65
9.5	Závěr pevnostní analýzy	66
10	Závěr	67
11	Použité zdroje	68
12	Seznam příloh	70

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Název	Jednotka
DLL	dynamicky linkovaná knihovna	
f_1	koeficient smykového tření ferodo-ocel (nejnižší hodnota)	[-]
f_2	koeficient smykového tření mezi plochami z hliníkové slitiny	[-]
f_3	koeficient smykového tření ferodo-ocel (střední hodnota)	[-]
F_{p1}	síla jedné tlačné pružiny, kloub 1	[N]
F_{p2}	síla tlačné pružiny, kloub 2	[N]
F_{p3}	síla tlačné pružiny, kloub 3	[N]
F_{p4}	síla tlačné pružiny, kloub 4	[N]
F_{p5}	síla tlačné pružiny, kloub 5	[N]
$F_{pruž2}$; $F_{pruž2max}$	síla tažné pružiny, kloub 2	[N]
$F_{pruž3}$; $F_{pruž3max}$	síla tažné pružiny, kloub 3	[N]
F_{t1}	třecí síla, kloub 1	[N]
F_{t2}	třecí síla, kloub 2	[N]
F_{t3}	třecí síla, kloub 3	[N]
F_{t4}	třecí síla, kloub 4	[N]
F_{t5}	třecí síla, kloub 5	[N]
k_2	tuhost tažné pružiny, kloub 2	[Nmm ⁻¹]
k_3	tuhost tažné pružiny, kloub 3	[Nmm ⁻¹]
$l_{pruž2}$	délka tažné pružiny, kloub 2	[mm]
$l_{pruž3}$	délka tažné pružiny, kloub 3	[mm]
M_1 ; M_{1max}	moment vyvolaný tíhovými účinky soustavy, kloub 1	[Nm]
M_2 ; M_{2max}	moment vyvolaný tíhovými účinky soustavy, kloub 2	[Nm]
M_{2zbmax}	celkový moment v kloubu 2 po vyvážení tažnou pružinou	[Nm]
M_3 ; M_{3max}	moment vyvolaný tíhovými účinky soustavy, kloub 3	[Nm]
M_{3zbmax}	celkový moment v kloubu 3 po vyvážení tažnou pružinou	[Nm]
M_4 ; M_{4max}	moment vyvolaný tíhovými účinky soustavy, kloub 4	[Nm]
M_5 ; M_{5max}	moment vyvolaný tíhovými účinky soustavy, kloub 5	[Nm]
plug and play	počítačová technologie pro rychlou detekci hardwaru	
q	významnost kritérií	[-]
r_{t1}	poloměr, na kterém působí třecí síla, kloub 1	[mm]
r_{t2}	poloměr, na kterém působí třecí síla, kloub 2	[mm]
r_{t3}	poloměr, na kterém působí třecí síla, kloub 3	[mm]
r_{t4}	poloměr, na kterém působí třecí síla, kloub 4	[mm]
r_{t5}	poloměr, na kterém působí třecí síla, kloub 5	[mm]
$r_{pruž2}$; $r_{pruž2max}$	poloměr, na kterém působí síla tažné pružiny, kloub 2	[mm]
$r_{pruž3}$; $r_{pruž3max}$	poloměr, na kterém působí síla tažné pružiny, kloub 3	[mm]
RP	Rapid Prototyping	
s_2	dráha tažné pružiny, kloub 2	[mm]
s_3	dráha tažné pružiny, kloub 3	[mm]
v	počet voleb	[-]
ϕ , ϕ_{krit}	poloha ramene 2; poloha ramene 2 v kritické situaci	[°]

Úvod

Hlavním úkolem bakalářské práce je navrhnout haptické zařízení s pěti stupni volnosti včetně definování vhodného senzorického vybavení. Účelem zařízení je ovládání manipulačního ramene existujícího mobilního robotu Hardy. Všechny systémy hasícího a zásahového robotu se doposud ovládají pomocí gamepadu. Takové řešení se v praxi ukázalo jako nedostatečné a zdlouhavé. Proto bude zkonstruován nový ovladač eliminující nedostatky gamepadu. Při návrhu musí být kladen důraz především na názornost ovládání a jednoduchost řízení.

Haptická technologie představuje zajímavé řešení problému. Definici této technologie poskytuje ve své internetové prezentaci např. firma Novint: „Haptika je vědecký obor studující hmatové vjemy. V oblasti IT se haptika zabývá vytvářením těchto vjemů v interakci člověka s počítačem.“ (15). V praxi to znamená, že se uživatel takového zařízení může dotýkat virtuálních nebo vzdálených objektů. Pro zprostředkování dotyku jsou haptické systémy vybaveny zpravidla elektromotory a vhodnými senzory. Snímají se souřadnice koncového bodu (rukojeti) a jeho dráha. Pokud koncový bod narazí na povrch virtuálního nebo vzdáleného objektu, motor vygeneruje reakční moment. Uživatel následně fyzicky pocítí tlak simulující dotyk s daným objektem.

1 Rešerše dostupných haptických zařízení

V kapitole jsou uvedeny výsledky průzkumu dostupných haptických zařízení použitelných pro potřeby řízení servisního robotu. Jednotlivé produkty jsou řazeny do podkapitol podle počtu stupňů volnosti.

1.1 Haptické systémy se třemi stupni volnosti

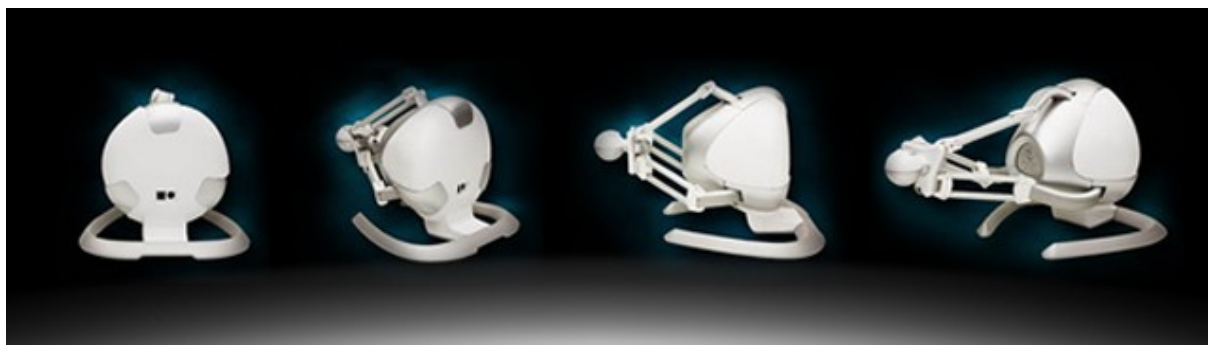
Haptické systémy se třemi stupni volnosti jsou mnohdy základní a cenově nejdostupnější produkty specializovaných firem. Ovladače s více stupni volnosti vychází z těchto modelů a dále je rozvádí. Výrobky nabízejí možnost zpětné vazby - tj. vytvoření reakční síly, vibrací, apod. Kinematický řetězec většiny systémů je uzavřený.

Novint Falcon

Haptické zařízení vyráběné americkou firmou Novint. Kinematická struktura tvaru delta umožňuje posuv v osách x, y, z. V uzavřené části ovladače jsou tři elektromotory, jež posouvají jednotlivá dvoukloubová ramena. Ta jsou spojena v interface trojúhelníkového tvaru, na který se mohou napojit různé rukojeti. K výrobku je dodávána základní, kulovitá rukojeť se 4 tlačítka umožňující další pohyb, popř. vykonávají určitý typ akce. Toto zařízení, zobrazené na obr. 1.1 je navrženo hlavně pro počítačové hráče a návrháře pracující v 3D studiích. Podle výrobce umožňuje Novint Falcon 3D dotyk, což lidem dovoluje virtuálně se "dotýkat" předmětů navrhovaných v 3D programech. Podstata tohoto efektu je ve snímání polohy kurzoru a vytvoření reakční síly při dotyku s překážkou. Kromě zmíněného využití se dá zařízení využít také na ovládání robotů. Technické údaje, převzaté z webových stránek výrobce (15), jsou uvedeny v tab. 1.1.

Pracovní prostor:	cca 100 x 100 x 100 mm
Max. reakční síla:	pod 9 N
Hmotnost:	2,7 kg
Cena:	\$ 197,99

Tab. 1.1: Technické údaje ovladače Novint Falcon



Obr. 1.1: Novint Falcon

Force Dimension Omega 3

Omega 3 švýcarské firmy Force Dimension nabízí přímou alternativu k ovladači Novint Falcon. Princip funkce zařízení je prakticky totožný s řešením firmy Novint. Jediný rozdíl je ve tvaru poháněné části ramena. Design zařízení Omega 3 je propracovanější a použité materiály (minimum plastových částí) zaručují lepší tuhost a mechanickou odolnost. Na kulovité rukojeti je jedno programovatelné tlačítko. Model Omega 3 je, ve srovnání s ovladačem Falcon, schopen vyvinout větší reakční sílu. Lze očekávat, že díky zpracování, použitým materiálům a technickým parametrům bude cena produktu řádově vyšší. Tomu odpovídá i možnost využití produktu, určeném především na ovládání robotů a manipulátorů, 3D návrhy, nácviková zařízení a výzkum. Výrobce uváděné (7) technické údaje jsou obsaženy v tab. 1.2, zařízení je znázorněno na obr. 1.2.

Pracovní prostor:	Φ160 x 110 mm
Max. reakční síla:	12 N
Přesnost:	min. 0,01 mm

Tab. 1.2: Technické údaje ovladače Omega 3



Obr. 1.2: Force Dimension Omega 3

Force Dimension Delta 3

Další produkt firmy Force Dimension. Delta 3, zobrazená na obr. 1.3, je zvětšená modifikace zařízení Omega 3 se zachováním technologie pohybu. Při zachování stejné přesnosti má uživatel k dispozici více než dvojnásobný pracovní prostor a působící reakční síla může dosáhnout hodnoty až 20 N. Základna je u této verze pro větší všestrannost nastavitelná od 0° do 90°. Delta 3 nachází využití jak v zábavním průmyslu (virtuální realita), tak především při přesném ovládání robotů a ve výzkumu. Technické údaje poskytované výrobcem (7) jsou uvedeny v tab. 1.3.

Pracovní prostor:	Φ400 x 260 mm
Max. reakční síla:	20 N
Přesnost:	min. 0,01 mm

Tab. 1.3: Technické údaje ovladače Delta 3



Obr. 1.3: Force Dimension Delta 3

1.2 Haptické systémy se čtyřmi stupni volnosti

Mezi produkty firem vyrábějících haptické systémy nebyl nalezen žádný konkrétní ovladač se čtyřmi stupni volnosti. Přesto existují různá řešení pro ty, kteří akutně potřebují právě daný počet pohyblivých os. Zařízení s deltovou kinematickou strukturou a třemi stupni volnosti mají vyměnitelné madlo. Zákazník si tedy může nechat zhotovit rukojeť s jedním stupněm volnosti přímo výrobcem systému, svépomocí nebo externí firmou. Problematickým faktorem zde bude cena atypického výrobku ve srovnání s běžně dostupnými haptickými ovladači s šesti stupni volnosti.

1.3 Haptické systémy s pěti stupni volnosti

Zařízení s pěti stupni volnosti patří na trhu s haptickými systémy spíše k raritám. Nasvědčuje tomu i fakt, že komerčně dostupný je pouze jediný exemplář. Jako v minulé části, i zde existuje možnost nechat si vyrobit zařízení na míru.

Quanser Haptic Wand

Haptic Wand vyrábí kanadská společnost Quanser. Jedná se o haptické zařízení s kinematickou strukturou dvou pantografů, mezi nimiž je umístěna rukojeť. Té je umožněna translace ve všech třech osách a rotace kolem dvou os. Každý pantograf je vybaven třemi stejnosměrnými servomotory, z nichž dva jsou umístěny v ramenech a jeden v naklápěcím členu ramen. Výrobek najde uplatnění především v simulaci, modelování a ovládání robotů. Technické údaje, zjištěné z webových stránek výrobce (1), jsou uvedeny v tab. 1.4. Zařízení je znázorněno na obr. 1.4.

Pracovní prostor - translace (osa x; y; z):	± 240 mm; +85 - +335 mm; -215 - +235 mm
Pracovní prostor - rotace (osa x; y):	$\pm 85^\circ$; $\pm 65^\circ$
Max. reakční síla (osa x; y; z):	2,3 N; 2,1 N; 3,0 N
Max. reakční moment (osa x; y):	0,23 Nm; 0,23 Nm

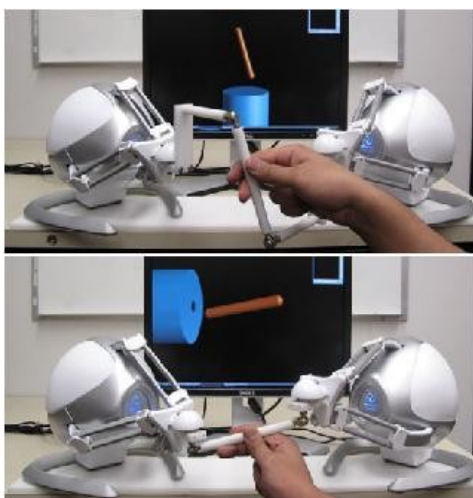
Tab. 1.4: Technické údaje ovladače Haptic Wand



Obr. 1.4: Quanser Haptic Wand

Upravené zařízení využívající Novint Falcon

A. V. Shah a kol. (21) uvádí návod na stavbu cenově dostupného haptického zařízení s pěti stupni volnosti. Řešení využívá dva ovladače Novint Falcon se třemi stupni volnosti. Podstata úpravy spočívá ve spojení jejich rukojetí pomocí ramene s klouby. Výsledek, podobný předchozímu produktu Haptic Wand, je na obr. 1.5. Rukojeť může mít svislou, či vodorovnou základní polohu.



Obr. 1.5: Upravené zařízení využívající Novint Falcon

1.4 Haptické systémy s šesti stupni volnosti

Většina komerčně dostupných haptických systémů zařízení disponuje šesti stupni volnosti. Ve většině případů se jedná o univerzální zařízení schopná přesně ovládat ramena robotů, pomáhat při tvorbě 3D modelů a simulaci lékařských zákroků. Na trhu je k dispozici dostatečný počet konstrukčních variant. Mezi nimi je nejčastější deltová kinematická struktura obohacená o rotace a šestiosá ramena.

Force Dimension Omega 6

Omega 6 je kompaktní haptický ovladač s deltovou kinematickou strukturou. Rukojeť je válcová a je doplněna o tři rotační osy. Konstrukce je dostatečně robustní. Podle údajů výrobce nebyl na žádnou kritickou část použit plastový prvek. Zařízení je schopno vyvíjet reakční síly pouze k translačním pohybům. Při rotacích je snímána pouze poloha rukojeti. Gravitační účinky jsou vyrovnávány, aby po puštění nedošlo k pádu ramene. Technické údaje produktu poskytované výrobcem (7) obsahuje tab. 1.5. Ovladač je zobrazen na obr. 1.6.

Pracovní prostor - translace:	Φ 160 x 110 mm
Pracovní prostor - rotace (osa x; y; z):	240°; 140°; 320°
Max. reakční síla:	12 N
Přesnost (translace; rotace):	0,01 mm; 0,09°

Tab. 1.5: Technické údaje ovladače Omega 6



Obr. 1.6: Force Dimension Omega 6

Force Dimension Delta 6

Produkt Delta 6 kinematicky vychází ze série Omega, ale oproti ní nabízí několik vylepšení. Kromě většího pracovního prostoru se jedná hlavně o rozdílnou konstrukci rukojeti. Proto také, kromě vyvozování reakčních sil, dokáže vyvodit i reakční moment. Nevýhodou je menší rozsah pohybu. Tato funkce se hodí především pro simulace a 3D modelování, kde se tímto vytvoří realističtější prostředí. Technické údaje, poskytované výrobcem (7), jsou uvedeny v tab. 1.6. Zařízení je znázorněno na obr. 1.7.

Pracovní prostor - translace:	Φ 400 x 260 mm
Pracovní prostor - rotace:	$\pm 22^\circ$ všechny osy
Max. reakční síla - translace:	20 N všechny osy
Max. reakční moment:	0,15 Nm všechny osy
Přesnost (translace; rotace):	0,01 mm; 0,09°

Tab. 1.6: Technické údaje ovladače Delta 6



Obr. 1.7: Force Dimension Delta 6

Haption Virtuouse 6D Desktop

Produkt francouzské firmy Haption, znázorněný na obr. 1.8, na pohled připomíná předešlá zařízení. Uzavřený kinematický řetězec tvoří tři ramena vzájemně svírající úhel 120°. Každé rameno se skládá ze tří dílčích členů a k základně je připevněno rotační pevnou kloubovou vazbou. Totožné vazby spojují jednotlivé členy mezi sebou. Rameno přichycuje k rukojeti sférický kloub. Díky konstrukci a relativně malým rozměrům se zařízení využívá především jako doplněk CAD a 3D systémů. Technické údaje zařízení, převzaté z webové prezentace výrobce (11), jsou uvedeny v tab. 1.7.

Pracovní prostor - translace:	koule Φ 120 mm
Pracovní prostor - rotace:	$\pm 35^\circ$ všechny osy ve výchozí poloze
Max. reakční síla:	15 N
Max. reakční moment:	0,5 Nm
Přesnost (translace; rotace):	0,015 mm; 0,004°

Tab. 1.7: Technické údaje ovladače Virtuouse 6D



Obr. 1.8: Haption Virtuouse 6D Desktop

Haption 6D 35-45

Mezi základní charakteristické prvky zařízení patří velký pracovní prostor, silová odezva ve všech stupních volnosti, vyrovnávání gravitačních účinků a důraz na ergonomii. Otevřený kinematický řetězec, jehož členy jsou navzájem spojeny šesti pevnými kloubovými vazbami, se shoduje s kinematickou strukturou většiny průmyslových robotů. Ergonomicky tvarovaná rukojeť má několik programovatelných tlačítek a senzorů snímajících přítomnost ruky. Když se nikdo rukojeti nedotýká, motory se vypnou a nemůže nastat žádný pohyb. Prodejce nabízí i variantu se třemi stupni volnosti. Technické údaje zařízení, poskytované výrobcem (11), jsou obsaženy v tab. 1.8. Ovladač je zobrazen na obr. 1.9.

Pracovní prostor:	450 x 450 x 450 mm
Pracovní prostor - rotace:	$\pm 35^\circ$ všechny osy ve výchozí poloze
Max. reakční síla:	35 N
Max. reakční moment:	3 Nm
Přesnost:	0,006 mm

Tab. 1.8: Technické údaje ovladače 6D 35-45



Obr. 1.9: Haption 6D 35-45

Sensable Phantom Omni

Phantom Omni je z produkce firmy Sensable nejdostupnější. Kinematicky se jedná o otevřený řetězec s šesti rotačními osami. Na konci je vyměnitelná rukojeť. Standardně se dodává stylus se dvěma tlačítky. Díky své konstrukci a použitým materiálům je předurčen hlavně do uzavřených prostor a to jako doplněk k počítači. Tak jako všechna haptická zařízení i Phantom Omni dokáže vyvodit reakční síly a momenty, ale pouze na prvních třech osách. U ostatních os ovladač pouze snímá polohu. Používá se v široké škále oborů, především v medicíně, robotice a 3D modelování. Technické údaje, převzaté z webových stránek výrobce (10), jsou v tab. 1.9. Zařízení je znázorněno na obr. 1.10.

Pracovní prostor:	160 x 120 x 70 mm
Max. reakční síla:	3,3 N
Přesnost:	0,055 mm

Tab. 1.9: Technické údaje ovladače Phantom Omni



Obr. 1.10: Sensable Phantom Omni

Sensable Phantom Desktop

Phantom Desktop, zobrazený na obr 1.11, je vylepšená verze modelu Phantom Omni. Dokáže vyvinout větší reakční sílu, má větší přesnost a menší tření. Stejně jako předchozí zařízení, je i toto uváděno jako cenově výhodné. Technické údaje výrobku jsou převzaty z webových stránek výrobce (10) a jsou obsaženy v tab. 1.10.

Pracovní prostor:	160 x 120 x 70 mm
Max. reakční síla:	7,9 N
Přesnost:	0,023 mm

Tab. 1.10: Technické údaje ovladače Phantom Desktop



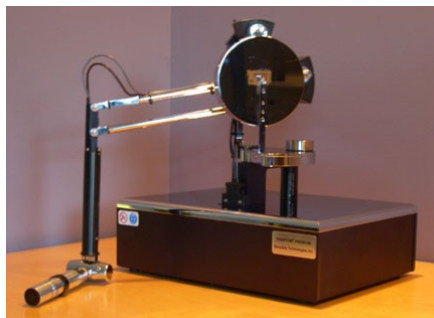
Obr. 1.11: Sensable Phantom Desktop

Phantom Premium

Produktová řada Phantom Premium představuje vývojový vrchol společnosti Sensable. Patří do ní celkem 7 haptických zařízení. Kinematicky se všechny shodují a tvoří je otevřený řetězec s šesti rotačními osami. V základní verzi mají ovladače tři stupně volnosti. Snímače polohy na zbývajících třech osách je možno dokoupit. Takto upravené modely vyvozují reakční síly a momenty ve všech šesti osách. Produkty řady Premium jsou dodávány s vlastní řídicí jednotkou. Tab. 1.11 obsahuje technické údaje produktů uváděné výrobcem (10). Na obr. 1.12 je vyobrazeno zařízení Phantom Premium 1.5/6DOF.

Model:	Premium 1.5/6DOF	Premium 1.5 HF/6DOF	Premium 3.0
Pracovní prostor - translace:	381 x 267 x 191 mm		838 x 584 x 406 mm
Pracovní prostor - rotace (r_x ; r_y ; r_z):	297°; 260°; 335°		
Max. reakční síla:	8,5 N	37,5 N	22 N
Max. reakční moment (M_x ; M_y ; M_z):	0,515 Nm; 0,515 Nm; 0,170 Nm		
Přesnost:	0,03 mm	0,007 mm	0,02 mm

Tab. 1.11: Technické údaje modelů řady Premium



Obr. 1.12: Sensable Phantom Premium 1.5/6 DOF

1.5 Haptické systémy se sedmi stupni volnosti

Ve většině případů se jedná o standardní haptické systémy s šesti stupni volnosti se speciální rukojetí umožňující další pohyb. Tyto ovladače patří mezi nejdražší na trhu a využívají je především lékaři při nácviku zákroků.

Sensable Phantom Premium 7 DOF

Společnost Sensable nabízí k produktům Phantom Premium 6DOF několik speciálních rukojetí opatřených extra pohybem. Jedná se o různé typy páček nebo napodobeniny lékařských nástrojů. Přídavné zařízení nedokáže vyvíjet reakční síly ani momenty. Používá se pouze pro snímání polohy. Výrobce (10) uváděné technické parametry rukojeti jsou v tab. 1.12. Na obr. 1.13 se nachází část rukojeti zařízení Phantom Premium 7 DOF.

Rozsah pohybu:	45°
Přesnost:	0,1 mm

Tab. 1.12: Technické parametry rukojeti zařízení Phantom Premium 7



Obr. 1.13: Část rukojeti zařízení Sensable Phantom Premium 7 DOF

Force Dimension Omega 7

Omega 7 je haptické zařízení, navazující na model Omega 6. Rukojeť se sedmým stupněm volnosti je upevněna k ramenům pomocí otevřeného kinematického řetězce se třemi kloubovými vazbami. Technické údaje poskytnuté výrobcem (7) jsou totožné s modelem Omega 6. Parametry sedmého stupně volnosti jsou v tab. 1.13. Zařízení je vidět na obr. 1.14.

Rozsah pohybu:	25 mm
Max. reakční síla:	± 8 N
Přesnost:	0,006 mm

Tab. 1.13: Technické parametry sedmého stupně volnosti ovladače Omega 7



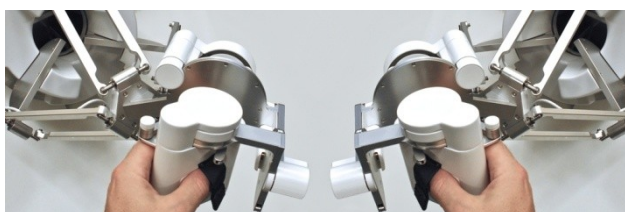
Obr. 1.14: Force Dimension Omega 7

Force Dimension Sigma 7

Model Sigma 7, znázorněný na obr. 1.15, je technicky nejdokonalejším řešením švýcarské společnosti. Robustní konstrukce nabízí stabilní a přesné ovládání tam, kde je zapotřebí vysoká přesnost a citlivost pohybů. Kinematicky je Sigma 7 shodná s předchozím modelem. Pevné kloubové vazby jsou poháněny motory, což umožňuje možnost vyvíjet síly a momenty na všech sedmi osách. Díky tomu je zařízení na trhu unikátní. Výrobcem uváděné technické údaje (7) jsou obsaženy v tab. 1.14.

Pracovní prostor - translace:	$\Phi 190 \times 130$ mm
Pracovní prostor - rotace (r_x ; r_y ; r_z):	235°; 140°; 200°
Pracovní prostor - stisk:	25 mm
Max. reakční síla (translace; stisk):	20 N; ± 8 N
Max. reakční moment:	0,4 Nm
Přesnost (translace; rotace; stisk)	0,012 mm; 0,013°; 0,006 mm

Tab. 1.14: Technické parametry modelu Sigma 7



Obr. 1.15: Force Dimension Sigma 7

2 Požadavky na konstrukční provedení ovladače

Hlavním účelem bakalářské práce je sestavení haptického ovladače pro hasicí a zásahový robot Hardy.

2.1 Robot Hardy

Hardy je víceúčelový mobilní servisní robot pohybující se v oblasti nebezpečného prostředí. Jeho hlavním úkolem je zasahovat při požárech v hutních provozech a odklízet tlakové lahve ze zasažené oblasti. Robot se skládá z pásového lokomočního ústrojí, manipulační nástavby a pracovního efektoru. Pásový podvozek je řízen diferenčně a pro ovládání stačí dva stupně volnosti. Manipulační rameno tvoří otevřený kinematický řetězec s pěti stupni volnosti. Rozsah pohybu jednotlivých ramen je uveden v tab. 2.1. Víceúčelový efektor je vybaven hasicí tryskou s regulací šířky kužele hasicího média. Dále jsou na efektoru umístěny tři přestavitelné uchopovací prvky, které dokážou uchopovat objekt manipulace ve dvou režimech. Robot Hardy je zobrazen na obr. 2.1.

Kloub 1:	$\pm 120^\circ$
Kloub 2:	125°
Kloub 3:	155°
Kloub 4:	Neomezená rotace s indikací výchozí polohy
Kloub 5:	$\pm 100^\circ$

Tab. 2.1: Rozsahy pohybů v kloubech ramene robotu Hardy



Obr. 2.1: Hasicí a zásahový robot Hardy

2.2 Požadavky na kinematickou strukturu a konstrukci ovladače robotu

Ze specifikací robotu Hardy byly určeny následující požadavky na konstrukci ovladače:

- pět stupňů volnosti pro ovládání manipulačního ramene
- dva stupně volnosti pro ovládání lokomočního ústrojí
- zachovat nebo se přiblížit rozsahu pohybů ramen robotu
- nízká hmotnost
- robustní konstrukce
- snadná přemístitelnost
- prostor pro umístění senzorického vybavení
- názornost a jednoduchost ovládání

2.3 Požadavky na technické vybavení ovladače

Ze známých údajů o robotu a jím vykonávané servisní úloze dále plynou následující požadavky na technické vybavení ovladače:

- řízení polohy koncového bodu
- řízení orientace posledního článku
- ovládání efektoru v obou režimech uchopení
- ovládání všech technologických funkcí robotu
- napájení z baterie
- jednoduchost řízení

3 Přehled vhodných snímačů ovladače robotu

Klíčovým prvkem každého ovladače je vhodné senzorické vybavení. Proto bude v následující kapitole uveden stručný výčet snímačů použitelných pro ovladač mobilního robotu.

3.1 Potenciometry

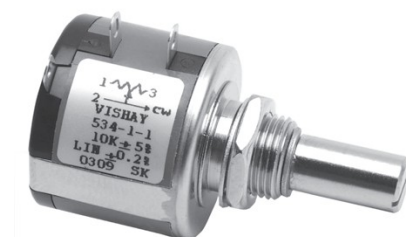
Potenciometr je druh rezistoru s měnitelnou velikostí odporu. Běžný analogový rotační potenciometr se skládá z jezdcy a uhlíkové odporové dráhy tvaru pravoúhlého trojúhelníku, jež je umístěna na vhodném válcovém podkladu. Jezdec, vyrobený z kovu nebo jiného vodivého materiálu je upevněn jedním koncem k hřídeli, zatímco druhým koncem se dotýká odporové dráhy. Potenciometr má tři vývody – jeden na začátku odporové dráhy, druhý na jejím konci a třetí na jezdcí. Potenciometr se využívá k řízení a ovládání spotřebičů a také jako snímač polohy. Snímače určené na měření polohy mají většinou lineární průběh.

Potenciometr Vishay 534

Víceotáčkový potenciometr v mono provedení. Specifikace produktu, převzaté z katalogu firmy GM Electronic (18), jsou v tab. 3.1. Potenciometr je znázorněn na obr. 3.1.

Elektrický odpor:	500 Ω
Tolerance:	5 %
Úhel otočení (mechanický i elektrický):	3600°
Rozměry (bez hřídele):	Φ 22 x 19 mm
Cena vč. DPH:	260 Kč
Objednací číslo:	113-047

Tab. 3.1: Technické údaje potenciometru Vishay 534



Obr. 3.1: Potenciometr Vishay 534

Potenciometr PC4WE500

Drátový jednootáčkový potenciometr v mono provedení. Technické údaje, převzaté z online katalogu firmy GM Electronic (18), jsou uvedeny v tab. 3.2.

Elektrický odpor:	500 Ω
Tolerance:	10 %
Úhel otočení (mechanický i elektrický):	3600°
Rozměry (bez hřídele):	Φ 24,2 x 11,9 mm
Cena vč. DPH:	78 Kč
Objednací číslo:	113-303

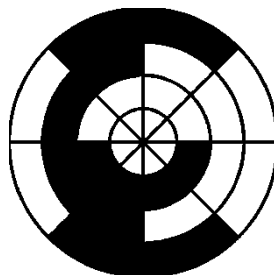
Tab. 3.2: Technické údaje potenciometru PC4WE500

3.2 Optické enkodéry

Optické enkodéry jsou optoelektronická zařízení určená pro přesné vyhodnocení polohy a otáček rotujících částí zařízení. Samotný enkodér se skládá z krytu, disku rotujícího na hřídeli, infračervené diody a fotodetektoru. Dioda emituje infračervené záření zachycované fotodetektorem. Mezi těmito prvky se otáčí skleněný disk, jenž funguje jako světelná clona. Rotací disk zastíňuje světelný paprsek, což generuje elektrické pulsy. Ty se vyhodnotí v řídicím počítači. Enkodéry se dále dělí na absolutní a inkrementální.

3.2.1 Absolutní enkodéry

Na skleněném disku jsou pomocí binárního, nebo tzv. Greyova kódování natištěny údaje o poloze. Rozlišení absolutních enkodérů závisí především na počtu stop. Disk s Greyovým kódem je znázorněn na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Disk s Greyovým kódem

Baumer ATD2AH00

Absolutní enkodér s dutou hřídelí. Technické údaje tohoto zařízení byly převzaty z katalogu firmy Baumer (6) a jsou uvedeny v tab. 3.3.

Rozměry (bez hřídele):	Φ 58 mm x 51,5 mm
Rozlišení:	14 bit
Napětí elektrického zdroje:	12 – 30 V DC
Hmotnost:	150 g
Stupeň krytí:	IP 65

Tab. 3.3: Technické údaje snímače Baumer ATD2AH00

3.2.2 Inkrementální enkodéry

Na obr. 3.3 je znázorněn disk inkrementálního snímače s typickou paprskovou strukturou. Při konstantních otáčkách hřídele je výstupní signál sinusový s obdélníkovou vlnou. Jedním z důležitých parametrů je počet kanálů inkrementálního snímače. Jeden kanál je roven jedné pulsové cloně na disku. Nejběžnější inkrementální snímače mají tři kanály. První dva kanály se liší jen posunem o 90° a slouží pro snímání obecné polohy a směru otáčení. Třetí kanál vytváří nulový puls. Výstupní signál je většinou obdélníkový. Pro zvýšení přesnosti snímačů se používá dvojnásobné a čtyřnásobné vyhodnocení signálu. Na rozdíl od absolutních enkodérů však po každém spuštění vyžadují synchronizaci.



Obr. 3.3: Disk dvoukanalového inkrementálního snímače

Baumer ITD 01 B14

Miniaturní optický inkrementální enkodér s dutou hřídelí. Základní technické údaje, poskytnuté firmou Baumer (6), jsou uvedeny v tab 3.4.

Rozměry (bez hřídele):	Φ 24 mm x 24 mm
Rozlišení:	30 až 1024 pulsů za otáčku
Napětí elektrického zdroje:	5 V DC; 8 – 30 V DC
Hmotnost:	50 g
Stupeň krytí:	IP 52

Tab. 3.4: Technické údaje senzoru Baumer ITD 01 B14

3.3 Magnetické snímače

Magnetické snímače představují dynamicky se rozvíjející oblast průmyslové sensoriky. Podstata měření spočívá ve vyhodnocování změn v magnetickém poli kolem senzoru. V současnosti existuje několik druhů magnetických snímačů vhodných pro použití při konstrukci ovladače robotu Hardy.

3.3.1 Magnetický absolutní snímač

Obdobně jako u optického absolutního enkodéru je i zde na otáčejícím se disku zakódovaná informace o jeho poloze. Používá se binární a Greyův kód. Nositelem informace je vícepólový magnet, jehož otáčení zaznamenává magnetorezistor. Na trhu jsou k dispozici snímače s různými typy výstupů. Mezi nejběžnější patří například výstupy průmyslové sítě SSI, CANopen nebo EtherNet/IP.

Baumer ATD 07S A 4

Miniaturní magnetický absolutní enkodér s dutou hřídelí, Greyovým kódováním a SSI výstupem. Technické údaje, pocházející z katalogu firmy Baumer (6), jsou uvedeny v tab. 3.5. Snímač je znázorněn na obr. 3.4.

Rozměry (bez hřídele):	Φ 24 mm x 24 mm
Rozlišení:	12 bit
Napětí elektrického zdroje:	8 – 26 V DC
Hmotnost:	50 g
Stupeň krytí:	IP 65

Tab. 3.5: Technické údaje senzoru Baumer ATD 07S A 4



Obr. 3.4: Senzor Baumer ATD 07S A 4

3.3.2 Magnetický inkrementální snímač

Magnetorezistor ve snímači vyhodnocuje změny v magnetickém poli vyvolané otáčením vícepólového magnetu připevněného k hřídeli. Ty mají sinusový charakter s obdélníkovou vlnou. Rozlišení snímače je závislé na počtu pólů magnetu a způsobu vyhodnocení signálu. Výstup je totožný s výstupem optických inkrementálních senzorů.

Baumer ITD 06 B14Y13

Miniaturní magnetický inkrementální enkodér. Technické údaje, převzaté z online katalogu firmy Baumer (6), se nacházejí v tab. 3.6. Senzor je zobrazen na obr. 3.5.

Rozměry (bez hřídele):	Φ24 mm x 30 mm
Rozlišení:	4 až 1024 pulsů za otáčku
Napětí elektrického zdroje:	5 V DC; 8 – 30 V DC
Hmotnost:	160 g
Stupeň krytí:	IP 66

Tab. 3.6: Technické údaje senzoru Baumer ITD 06 B14Y13



Obr. 3.5: Senzor Baumer ATD 07S A 4

3.3.3 Magnetický induktivní snímač

Jádrem magnetických induktivních snímačů je cívka, která generuje magnetické pole. Když se nad dané místo v poli přiblíží feromagnetický aktivátor (nejlépe ocelový), magnetické siločáry se deformují, na aktivátoru vzniknou vířivé proudy a dojde ke změně parametrů pole. Kromě cívky je v induktivním snímači i LC oscilační obvod, jehož amplituda je sledována a převedena na výstupní signál.

Gill 360° Blade Rotary Sensor

Gill 360° Blade Rotary Sensor je bezkontaktní senzor polohy s analogovým výstupem a výstupem na průmyslovou sběrnici RS 485. Technické údaje, převzaté z katalogu firmy Gill (20), se nacházejí v tab. 3.7. Snímač je vyobrazen na obr. 3.6.

Rozměry (bez hřídele):	Φ38 mm x 16 mm
Rozlišení:	30 až 1024 pulsů za otáčku
Napětí elektrického zdroje:	4,8 - 32 V DC
Hmotnost:	33 g
Stupeň krytí:	IP 67

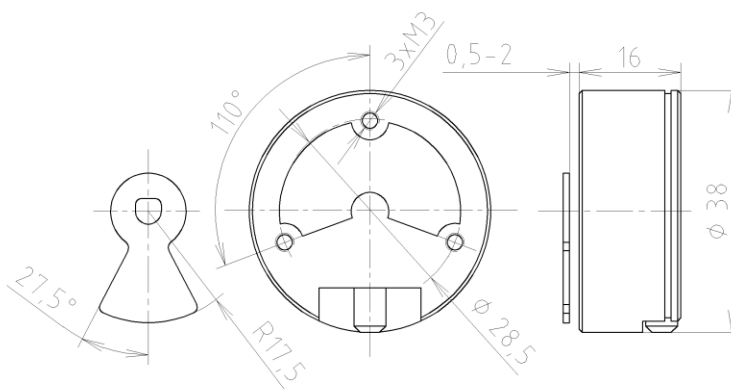
Tab. 3.7: Technické údaje snímače Gill 360° Blade Rotary Sensor



Obr. 3.6: Snímač Gill 360° Blade Rotary Sensor

3.4 Výběr vhodného snímače pro ovladač robotu Hardy

Výše uvedené senzory byly porovnávány z mnoha hledisek. Mezi ně patřila hmotnost, rozměry, typ a spojitost výstupu, rozlišení, napětí elektrického zdroje, robustnost, spolehlivost a stupeň krytí senzoru. Podle výše zmíněných kritérií byl vybrán snímač Gill 360° Blade Rotary Sensor popsaný v kapitole 3.3.3. Nabízí jak analogový napěťový výstup, tak výstup na sběrnici RS 485, která může zajistit snadné propojení senzorů. Dalšími rozhodujícími výhodami byly malé rozměry, nízká hmotnost a bezkontaktní provedení. Rozměrové schéma senzoru je na obr. 3.7. Datový list s kompletními specifikacemi výrobku je v příloze A.



Obr. 3.7: Rozměry senzoru Gill 360° Blade Rotary Sensor a jeho aktivátoru (údaje v mm)

4 Hardware pro zpracování signálu ze snímačů

Pro komunikaci s řídicím počítačem je zapotřebí použít vhodný převodník. U ovladače manipulačního ramene lze předpokládat zapojení senzorů do počítače přes linku RS 485. Kdyby se toto propojení ukázalo z jakéhokoliv důvodu jako nevýhodné, použil by se analogový výstup. Rovněž lze očekávat, že ovládání pásového podvozku bude realizováno joystickem. Tato zařízení mají rovněž zpravidla analogový výstup. V této kapitole provedena rešerše zařízení zpracovávajících signál z uvedených zdrojů.

4.1 Převodníky ze sběrnice RS 485

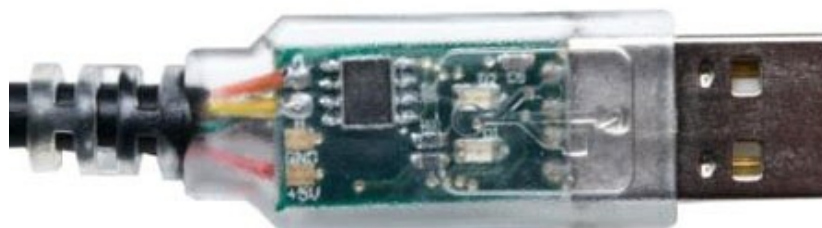
Pro převod dat ze sběrnice RS 485 do řídicího PC je potřeba převodník. Na trhu existují převážně převodníky typu RS 485-USB a RS 485-RS 232, což je běžná sériová linka. Port RS 232 je dnes na osobních počítačích spíše raritou, ale ve většině průmyslových a řídicích počítačů by měl být přítomen.

Převodník USB – RS 485 – WE

Tento miniaturní převodník slouží ke konverzi sériového signálu ze sběrnice RS 485 do rozhraní USB 2.0. Veškerá elektronika převaděče je integrovaná do USB konektoru. Pro komfort uživatele je zde také integrovaná světelná signalizace toku dat. Z konektoru vychází šestižilový kabel určený k zapojení na konec sítě RS 485. Jako terminátor lze volitelně připojit rezistor o velikosti 120 Ω . Převodník není galvanicky oddělený od počítače. Konvertor také nabízí možnost zabezpečení a možnost softwarového řízení toku dat. Komunikace s PC probíhá prostřednictvím DLL nebo přes virtuální COM port. Produkt je kompatibilní i se starším softwarem pro tento port. Technické údaje konvertoru, uváděné výrobcem (19), jsou v tab. 4.1. Zařízení je znázorněno na obr. 4.1.

Rychlost datového přenosu:	300 Bd až 3MBd
Délka kabelu:	1,8 m
Cena vč. DPH:	1282 Kč

Tab. 4.1: Technické údaje převodníku USB – RS 485 – WE



Obr. 4.1: Převodník USB – RS 485 – WE

Převodník UC-232

Převodník české firmy Tedia zajišťuje konverzi dat z linky RS 485 do USB 2.0 a je vestavěn do miniaturního pouzdra. Model vyniká vysokou odolností proti indukovanému přepětí. Linka RS 485 je vybavena transily a je plnohodnotně oddělena od USB portu. Převodník má světelnou signalizaci toku dat, aktivní zakončovací impedancí 120 Ω a je napájen z řídicího počítače prostřednictvím USB. Technické specifikace produktu uváděné výrobcem (23) jsou v tab. 4.2. Produkt je zobrazen na obr. 4.2.

Rychlost datového přenosu:	300 Bd – 460 kBd
Rozměry (délka x šířka x výška):	1,8 m
Hmotnost:	10 g
Cena vč. DPH:	2040 Kč

Tab. 4.2: Technické údaje převodníku UC-232



Obr. 4.2: Převodník UC-232

Konvertor CON-485-PI9

Průmyslový konvertor CON-485-PI9 vyráběný americkou společností Sima S. Enterprises převádí data z linky RS 485 do sériového rozhraní RS 232. Napájí se z řídicího počítače linkou RS 232. Linky jsou galvanicky odděleny. Technické údaje převodníku pocházejí z online katalogu výrobce (12) a jsou uvedeny v tab. 4.3. Převodník je na obr. 4.3.

Rychlost datového přenosu:	300 Bd – 115 kBd
Rozměry (délka x šířka x výška):	71,2 x 33,8 x 16,8 mm
Hmotnost:	23 g
Cena vč. DPH:	\$ 35,95

Tab. 4.3: Technické údaje konvertoru CON-485-PI9



Obr. 4.3: Konvertor CON-485-PI9

4.2 Převodníky z analogového signálu

Pro převod dat z analogového signálu do digitálního se používají tzv. A/D převodníky. Princip digitalizace signálu spočívá v rozdělení analogové křivky signálu na body, z nichž se dá zpětně reprodukovat. Veličina určující počet vytvořených bodů za vteřinu se nazývá vzorkovací frekvence. Čím je frekvence vyšší, tím vyšší kmitočty dokáže zaznamenat. Dalšími důležitými parametry jsou rozlišení a vstupní rozsahy A/D převodníku.

UDAQ-1408 USB multifunkční modul

Multifunkční modul, vyráběný společností Tedia, je externí A/D převodník s USB výstupem typu Plug and Play. Je vybaven předřazeným programovatelným zesilovačem a multiplexorem. Analogový signál do vstupů je přiveden stíněnými vodiči o maximální délce 2 m. Celý modul, znázorněný na obr. 4.4, je napájen výhradně z USB. Technické údaje, převzaté z datového listu výrobce (23), jsou uvedeny v tab. 4.4.

Počet analogových vstupů:	8 (neizolované-verze A, izolované-verze E)
Rozlišení A/D převodníku:	14 bit
Vstupní rozsahy:	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0,5\text{ V}$, $\pm 0,2\text{ V}$
Vzorkovací frekvence:	40 kHz
Rozměry (délka x šířka x výška)::	140 x 110 x 35 mm
Cena vč. DPH:	4641 Kč verze A, 6783 verze E

Tab. 4.4: Technické údaje A/D modulu UDAQ – 1408 USB



Obr. 4.4: A/D multifunkční modul UDAQ-1408 USB

Analogová měřicí karta ISO-813/S CR

Měřicí A/D karta do PC firmy ICP DAS má zvýšený izolační rozsah do 3000 V. Karta je rovněž vybavena programovatelným zesílením signálu. Napájena je přímo z řídicího počítače. Karta se prodává společně s deskou pro připojení analogových signálů, se kterou je spojena pomocí 37 pinového konektoru typu D-Sub. Technické parametry karty, uváděné výrobcem (2), jsou v tab. 4.5. Měřicí karta je zobrazena na obr. 4.5.

Počet analogových vstupů:	32 izolovaných
Rozlišení A/D převodníku:	12 bit
Vstupní rozsahy:	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2,5\text{ V}$, $\pm 1,25\text{ V}$, $\pm 0,625\text{ V}$, $\pm 0,3125\text{ V}$
Vstupní impedance:	10 M Ω
Rozměry (délka x šířka x výška):	174 x 122 mm karta, 220 x 114 mm připojovací deska
Cena vč. DPH:	7068 Kč včetně připojovací desky

Tab. 4.5: Technické údaje měřicí karty ISO-813/S CR



Obr. 4.5: Měřicí karta ISO-813/S CR

4.3 Výběr vhodného převodníku pro ovladač robotu Hardy

Pro převedení dat ze sběrnice RS 485 do řídicího počítače se jako optimální jeví použití převodníku USB – RS 485 – WE. Tento produkt je nejlehčí a nejlevnější nalezený převodník ze sběrnice RS 485. Dle údajů výrobce poskytuje také nejvyšší rychlost datového přenosu. USB výstup se jeví jako výhodný především pokud se jako řídicí počítač použije notebook. Datový list produktu je na internetových stránkách výrobce (19).

Při použití analogových výstupů snímačů nebo analogového joysticku bylo vyhodnoceno, že optimální variantou by v tomto případě bylo použití USB modulu. Toto řešení je cenově výhodnější, univerzálnější a prostorově úspornější. USB modul má také větší rozlišení A/D převodníku. Datový list produktu se nachází na stránkách výrobce (23).

5 Varianty řešení

V kapitole bude určena koncepce ovladače robotu Hardy, z níž vychází tři navrhované varianty řešení ovladače manipulačního ramene robotu. Všechny varianty jsou konstrukčně popsány. V průběhu vypracování variant ještě nebyly známy údaje o pracovním prostoru robotu, a proto jsou uvažovány i menší rozsahy pohybů než údaje uvedené v kapitole 2.

5.1 Koncepce ovladače

Ovladač robotu Hardy by měl být mobilní a dostatečně robustní. Jsou známy dva způsoby řízení robotu operátorem. Ve statické variantě operátor sedí v křesle. Na hlavě má speciální brýle zprostředkovávající trojrozměrný obraz situace. V mobilní variantě stojí operátor v bezpečné vzdálenosti od robotu, ale fyzicky ho vidí. Pro obě varianty řízení je vhodné umístit ovládání manipulačního ramene k jedné ruce operátora a ovládání

podvozku, případně dalších funkcí zmíněných v kapitole 2.3, k druhé ruce operátora. Oba ovladače budou umístěny na nastavitelných ramenech. Při statické variantě budou ramena upevněna k operátorskému křeslu, u mobilní varianty budou ramena připevněna k ovládacímu batohu. K ovládání pásového podvozku robotu bude sloužit joystick se dvěma stupni volnosti. Měl by mít alespoň dvě tlačítka k aktivaci hasící a úchopové funkce. Kromě joysticku bude na stejném rameni také ovládací panel pro indikaci stavu baterie a přepínání funkcí efektoru. Kabely z ovladačů povedou do rozvaděče, kde bude řídicí počítač a další nezbytná elektronika včetně výstražného systému. Pro optimální a pohotovostní ovládání výkonové nástavby a pracovního efektoru byly navrženy tři varianty. Varianty jsou vůči sobě odlišné jak kinematickou strukturou, tak i typem řízení a umístěním rukojeti.

5.2 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu – varianta 1

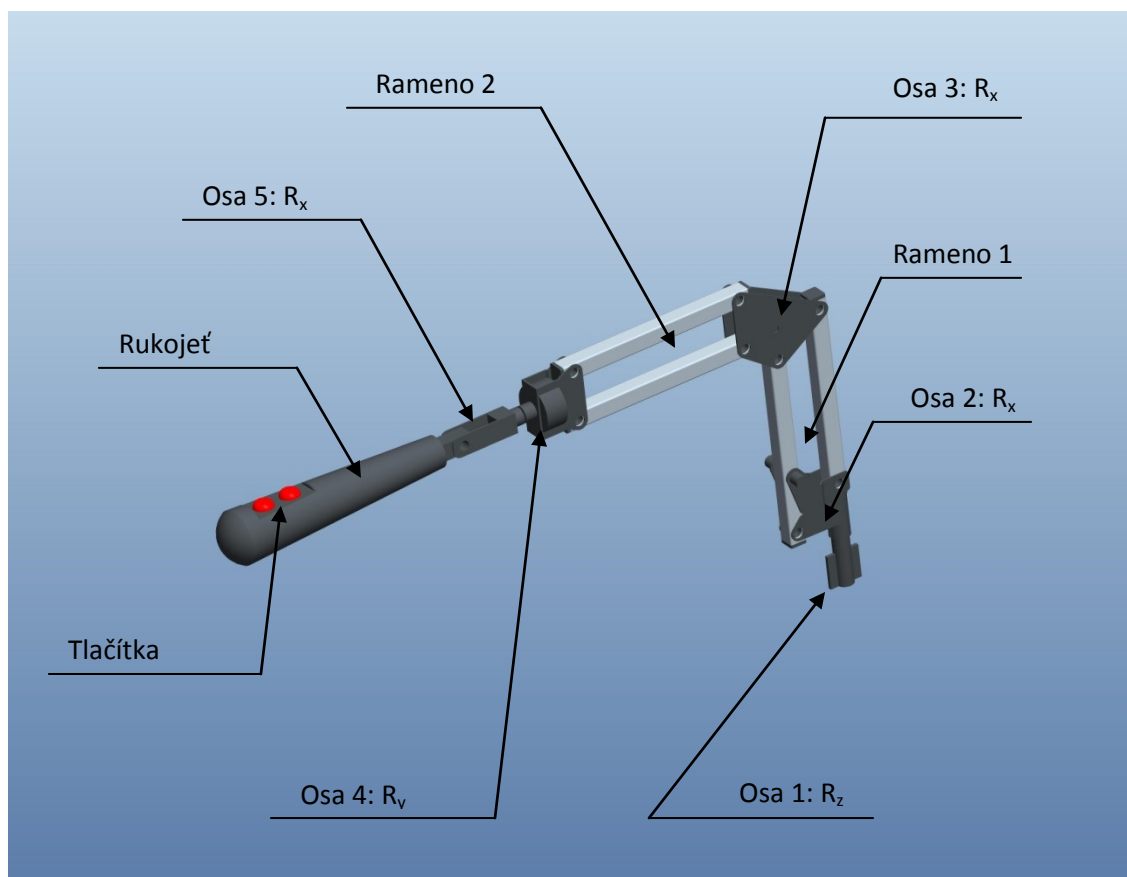
Kinematickou strukturu varianty 1 tvoří otevřený řetězec. Výhodou ovladače je jeho přehlednost a snadné ovládání. Jako materiál pro výrobu mechanických částí ovladače je použit polykarbonát s mechanickými a teplotními vlastnostmi uvedenými v tab. 5.1. Údaje byly převzaty z internetových stránek katedry robototechniky VŠB-TU Ostrava (14).

Pevnost v tahu:	68 MPa
Modul pevnosti v tahu:	2280 MPa
Teplotní odolnost:	do 138° C

Tab. 5.1: Mechanické a teplotní vlastnosti polykarbonátu

Konkrétní řešení problému je zobrazeno na Obr. 5.1. Senzor snímající natočení osy 1 je zabudován do konstrukce ramene spojujícího ovladač se základnou. Nad ním je v ložiscích upevněna dutá hřídel. Před operací se zde vloží ovladač zakončený protikusem. Musí být zajištěno, aby se zařízení v duté hřídeli neprotáčelo. Proto je protikus tvarovaný tak, aby tomuto jevu zabránil. Protikus je spojen se svěrnými deskami kloubu 2. Rameno 1 tvoří paralelogram zajišťující dostatečnou tuhost mechanismu při malých rozměrech a hmotnosti. Rameno 1 je s okolními klouby spojeno čepy zajištěnými z obou stran pojistnými kroužky. Ty jsou v rameni uloženy s přesahem a ve svěrných deskách kloubu s malou vůlí. To umožňuje, aby se čep při natáčení ramena rovněž otáčel. Polohový senzor je umístěn u každého kloubu vždy v jedné vazbě. Na konci čepu je připevněn snímáný aktivátor. Stejným způsobem je řešeno spojení ramene 2 se svěrnými deskami kloubu 3. K druhému konci je připevněno jednoduché orientační ústrojí spojující rukojeť s polohovadlem. Senzor snímající polohu osy 4 je umístěn uvnitř kloubu a čep s jeho aktivátorem je pevně spojen s kloubem 5. Snímáný čep kloubu je zalisován do rukojeti. Proti pádu rukojeti v případě náhlého puštění jsou kloubové vazby zajištěné třením. Uprostřed každého kloubu je vyvrtaná díra, kudy se prostrčí šroub zajištěný samojistnou maticí. Utahováním šroubu se zvětšuje tření mezi kloubem a bokem ramene. U osy 4 bude nutno použít brzdu. Kabelové vedení je umístěno v ramenech a dovnitř prochází přes průchodky. Rozsah pohybu na každé ose je omezen konstrukčními zádržkami. Maximální rozsah pohybu na jedné ose

je však z konstrukčních důvodů 140° . Základní technické údaje se nacházejí v tab. 5.2. Údaje byly získány z analýzy v softwarovém prostředí Pro Engineer, kde byl vytvořen trojrozměrný model této varianty. Výhody a nevýhody návrhu jsou shrnuty v tab. 5.3.



Obr. 5.1: Model varianty 1

Rozměry (délka x výška x šířka):	185 x 200 x 40 mm
Rozsah pohybu kloubu 1:	$\pm 60^\circ$
Rozsah pohybu kloubu 2:	max. 140°
Rozsah pohybu kloubu 3:	max. 140°
Rozsah pohybu kloubu 4:	$\pm 360^\circ$
Rozsah pohybu kloubu 5:	$\pm 100^\circ$

Tab. 5.2: Technické údaje varianty 1

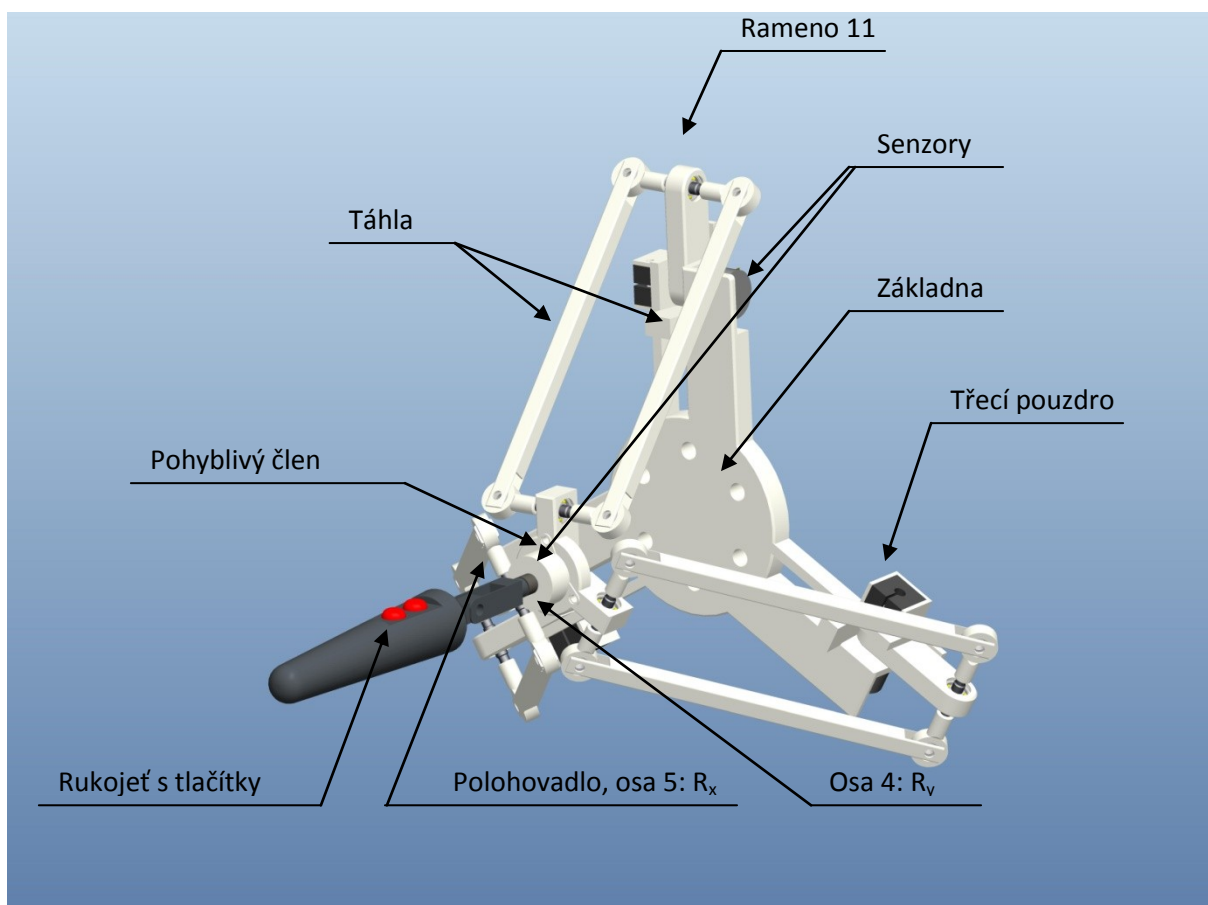
Výhody:	Nevýhody:
- velká přehlednost	- limitovaný rozsah pohybů
- intuitivní ovládání	- relativně křehká konstrukce
- snadný zácvik	- vůle v kloubech
- nízká cena	
- mobilní	
- řízení pomocí přímé úlohy kinematiky	
- nízká hmotnost	

Tab. 5.3: Výhody a nevýhody varianty 1

5.3 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu – varianta 2

Zařízení tvoří deltovitá kinematická struktura používaná některými výrobci haptických zařízení i robotů. Konkrétní konstrukční řešení je znázorněno na Obr. 5.2. Součásti jsou vyrobeny, stejně jako u předchozí verze, z polykarbonátu. K základně jsou pevně přichyceny tři senzory, jejichž čepy s aktivátory jsou pevně spojeny s rameny 11, 12 a 13. Čep prochází rameny do třetího pouzdra, pomocí něhož se udržuje poloha pohyblivého členu po puštění rukojeti. Do druhého konce ramen 11, 12 a 13 se z obou stran zalepí jednořadá kuličková ložiska a zajistí pojistnými kroužky. V ložiscích je uložena hřídel, do níž je z každé strany našroubován ložiskový domek a zajištěn nízkou maticí. Dovnitř jsou opět zalisována miniaturní ložiska zajištěná pojistným kroužkem. V ložiscích se otáčí čep zajišťující vazbu mezi táhlem a hřídelí. Každé táhlo je zdvojeno a vytváří paralelogram. Na druhém konci jsou táhla obdobným způsobem připojena k pohyblivému členu. Zde je připevněn senzor snímající rotaci osy 4. Na čep s aktivátorem je připevněno polohovadlo a rukojeť. Konstrukce, princip činnosti a zajištění polohovadla je provedeno stejně jako u kloubů 4 a 5 varianty 1.

Pohyblivý člen má tři stupně volnosti a pohybuje se ve třech translačních osách. Pohyb se snímá třemi snímači a pomocí inverzní úlohy kinematiky se počítá pohyb koncového členu robotu Hardy. Pracovní prostor ovladače a jeho rozměry jsou převzaty z elektronického modelu ovladače, vytvořeném v programu Pro Engineer a jsou uvedeny v tab. 5.4. Výhody a nevýhody návrhu uvádí tab. 5.5.



Obr. 5.2: Model varianty 2

Rozměry (délka x výška x šířka):	340 x 320 x 400 mm
Pracovní prostor (translace):	Φ140 mm x 100 mm
Rozsah pohybu kloubu 4:	±360°
Rozsah pohybu kloubu 5:	±100°

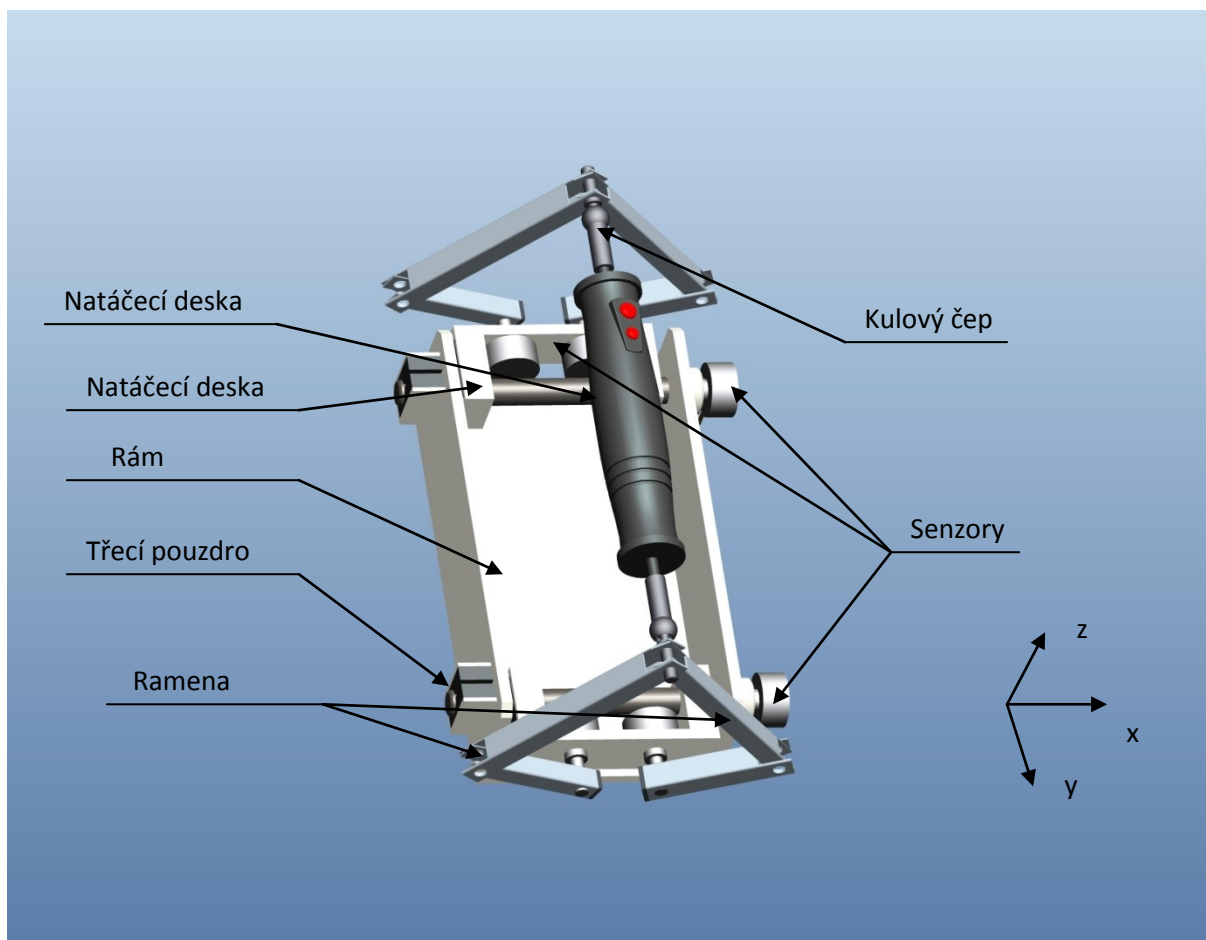
Tab. 5.4: Technické údaje varianty 2

Výhody:	Nevýhody:
- relativně snadné ovládání	- není možné ovládat natočení jednotlivých ramen vůči sobě
- ovladač v žádné poloze nepřekáží	
- natočení koncového členu jasně patrné	- řízení pomocí inverzní úlohy kinematiky
- robustní, pevná konstrukce	- velký objem součástí

Tab. 5.5: Výhody a nevýhody varianty 2

5.4 Konstrukce ovladače manipulačního ramene robotu - varianta 3

Kinematickou strukturu varianty 3, zobrazené na obr. 5.3 tvoří dva pantografy spojené pomocí rukojeti do jednoho celku připevněného na 2 naklápěcí desky spojené s rámem. Tato struktura má 5 stupňů volnosti, díky čemuž odpadá nutnost přítomnosti polohovadla.



Obr. 5.3: Model varianty 3

Na rám jsou v kluzných ložiscích uloženy dvě hřídele. Na jednom konci je třecí pouzdro zajišťující polohu hřídelí při puštění rukojeti. Na opačném konci jsou senzory s aktivátory. Ke hřídelím je pevně upevněna natáčecí deska, kde se nachází další 2 senzory. Jednotlivá ramena se na jedné straně připojí k natáčecí desce, na druhé straně se dvě ramena připojí k sobě pomocí kluzného spojení. Obě ramena jsou pomocí kulového čepu připojena k rukojeti.

Stejně jako u varianty 2 se translačním pohybem ovládá koncový bod robotu. Rukojeť je zároveň schopna rotačního pohybu ve všech třech osách. Rotací kolem osy z se řídí natočení 4. osy robotu Hardy tím způsobem, že při plném natočení, které je u této varianty cca 40°, robot pohyb vykonává nepřetržitě. Může se tedy natočit o více stupňů než samotný ovladač. Nevýhodou ovšem bude jistá ztráta přehlednosti. Rotací kolem osy x se řídí poloha 5. rotační osy robotu Hardy. Způsob řízení zde odpovídá předchozí ose. Rotace kolem osy y je pouze doplňková a nemá žádný konkrétní význam. Rotace je způsobena použitou kloubovou vazbou. Výhodou může být větší pohodlnost při ovládání. Technické údaje, získané z rozměrové analýzy modelu v softwarovém prostředí Pro Engineer, jsou uvedeny v tab. 5.6. Výhody a nevýhody modelu shrnuje tab. 5.7.

Rozměry ve výchozí poloze (délka x výška x šířka):	260 x 140 x 150 mm
Pracovní prostor translace (osa x; y; z):	±120 mm; ±70 mm; ±50 mm
Pracovní prostor rotace (osa x; y; z):	±20° v max. poloze; 360°; ±40°

Tab. 5.6: Technické údaje varianty 3

Výhody:	Nevýhody:
- základní kinematická struktura umožňuje všech 5 stupňů volnosti	- složitá konstrukce
- skladnost	- nutnost použití šesti senzorů
- ovladač v žádné poloze nepřekáží	- řízení pomocí inverzní úlohy kinematiky

Tab. 5.7: Výhody a nevýhody varianty 3

6 Výběr optimální varianty

V předcházející kapitole byly popsány jednotlivé varianty, jejich výhody a nevýhody. Toto hodnocení je však subjektivní a pro co nejlepší výsledek je nutno celý proces výběru maximálně objektivizovat. K tomu bude použita hodnotová analýza dle metodiky prof. Skařupy (22), kde se pomocí určených kritérií vyhodnotí všechny navržené varianty. Ta s nejlepším výsledkem bude stanovena jako optimální a bude dále rozpracována.

6.1 Stanovení kritérií

Základem pro hodnotovou analýzu jsou kritéria, jimž se z technickoekonomického hlediska přisuzuje největší význam. V praxi to jsou např. hmotnost, spotřeba, nosnost, přesnost, tuhost aj. V tomto případě byla pro zisk kritérií použita metoda odborné rozpravy.

V diskuzi se ukázalo, že kvantifikovatelnými kritérii pro výběr optimální varianty bude objem součástí vyráběných metodou Rapid Prototyping, vnější objem a hmotnost. Výroba součástí pomocí Rapid Prototypingu je cenově náročná, a proto je to jeden z hlavních parametrů pro určení ceny. Jelikož je počet použitých senzorů přibližně stejný, v analýze se objevuje místo celkové ceny právě objem součástí vytvářených metodou Rapid Prototyping. Vnější objem a hmotnost dávají informace o kompaktnosti zařízení a použitelnosti v mobilním ovládacím zařízení.

Mezi nekvantifikovatelná kritéria patří složitost řízení, názornost a komfort ovládání. Složitost řízení je determinována především užitím přímé nebo inverzní úlohy kinematiky. Názornost představuje podobnost polohy ovladače a robotu. Komfort ovládání závisí na fyzické náročnosti ovládání a překážení ovladače v některých polohách. Kvantifikace proběhla pomocí ordinální posuzovací stupnice, kdy jednotlivým kritériím byly přiřazovány body od 1 (vynikající) po 6 (nedostatečné).

6.2 Stanovení váhy významnosti jednotlivých kritérií

Pro určení významnosti kritérií byla použita metoda porovnávání v trojúhelníku párů, kde se porovnají jednotlivé varianty mezi sebou. Kritéria jsou porovnávána vždy po dvojicích tak, aby tímto způsobem byly porovnány všechny možnosti. Seznam jednotlivých kritérií, jejich číslo v porovnávací tabulce a hodnoty pro každou variantu obsahuje tab. 6.1.

Číslo kritéria	Název kritéria	Hodnota var. 1	Hodnota var. 2	Hodnota var. 3
1	Objem souč. vyr. RP	$7,1 \times 10^4 \text{ mm}^3$	$2,9 \times 10^5 \text{ mm}^3$	$2,7 \times 10^5 \text{ mm}^3$
2	Vnější objem	$1,5 \times 10^6 \text{ mm}^3$	$4,4 \times 10^7 \text{ mm}^3$	$5,4 \times 10^6 \text{ mm}^3$
3	Hmotnost	0,516 kg	0,721 kg	0,690 kg
4	Složitost řízení	2	4	5
5	Názornost	2	4	6
6	Komfort ovládání	5	3	2

Tab. 6.1: Kritéria hodnocení

Samotné porovnávání provádějí kvalifikovaní hodnotitelé, kteří vyplní předem stanovenou tabulku. Tab. 6.2 představuje vyplněnou tabulku použitou pro stanovení váhy významnosti jednotlivých prvků. Žlutě je zabarvena preferovaná možnost.

Porovnávané páry kritérií					Počet voleb	Pořadí	Váha významnosti
1 vs. 2	1 vs. 3	1 vs. 4	1 vs. 5	1 vs. 6	Kr. 1: 3,5	2.	0,35
	2 vs. 3	2 vs. 4	2 vs. 5	2 vs. 6	Kr. 2: 3	3.	0,3
		3 vs. 4	3 vs. 5	3 vs. 6	Kr. 3: 1,5	4.	0,15
			4 vs. 5	4 vs. 6	Kr. 4: 5	1.	0,5
				5 vs. 6	Kr. 5: 1		
					Kr. 6: 1	5. – 6.	0,1

Tab. 6.2: Stanovení váhy významnosti pomocí trojúhelníku párů

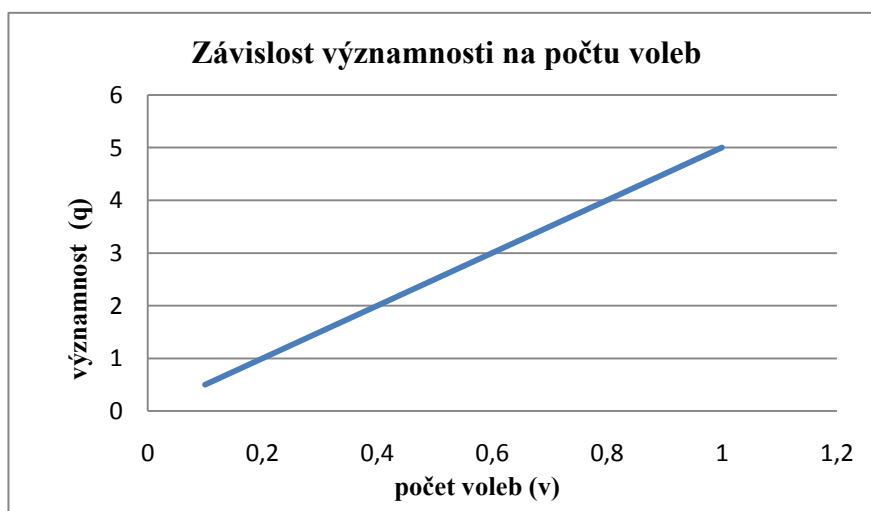
Váha významnosti bude určena v intervalu $\langle 0,1;0,5 \rangle$. Počty voleb jednotlivých kritérií se nalézají v intervalu $\langle 1;5 \rangle$. Byla zvolena lineární závislost, kde první interval určuje body q_1 a q_2 a druhý interval určuje body v_1 a v_2 . Po dosažení do obecné rovnice přímky byl získán vztah pro dopočet váhy významnosti.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \times (x - x_1) \quad (6.1)$$

$$q - 0,1 = \frac{0,5 - 0,1}{5 - 1} \times (v - 1)$$

$$q = 0,1 \times v$$

Průběh lineární závislosti je na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Závislost významnosti na počtu voleb

6.3 Stanovení optimální varianty pomocí zvolených kritérií

K hodnocení celkové úrovně jednotlivých variant byla použita metoda PATTERN. Vždy nejhorší hodnota u daného kritéria bude nést index 1,00, ostatní hodnoty se přepočtou dle zadaných hodnot a indexu tak, že budou vyšší v tom poměru, v jakém jsou lepší k variantě s indexem 1,00. Součin tohoto indexu a váhy významnosti je vážený index. Vážené indexy se na konci analýzy sečtou pro každou variantu. Výsledek je relativní úroveň dané varianty v procentech. Vážené indexy jednotlivých kritérií a celkový výsledek hodnotové analýzy je v tab. 6.3. Tabulka se všemi parametry provedené hodnotové analýzy je v příloze B.

Číslo kritéria	Název	Vážený index varianta 1	Vážený index varianta 2	Vážený index varianta 3
1	Objem součásti vyrobené metodou RP	1,429577	0,35	0,37592593
2	Vnější objem	8,8	8,8	2,44444444
3	Hmotnost	0,209593	0,15	0,15673913
4	Složitost řízení	1,25	0,625	0,5
5	Názornost	0,30	0,15	0,10
6	Komfort ovládání	0,10	0,17	0,25
	Součet vážených indexů	12,09	1,74	3,83
	Relativní úroveň	694,12	100,00	219,74
	Pořadí	1	3	2

Tab. 6.3: Hodnocení úrovně variant metodou PATTERN

6.4 Závěr hodnotové analýzy

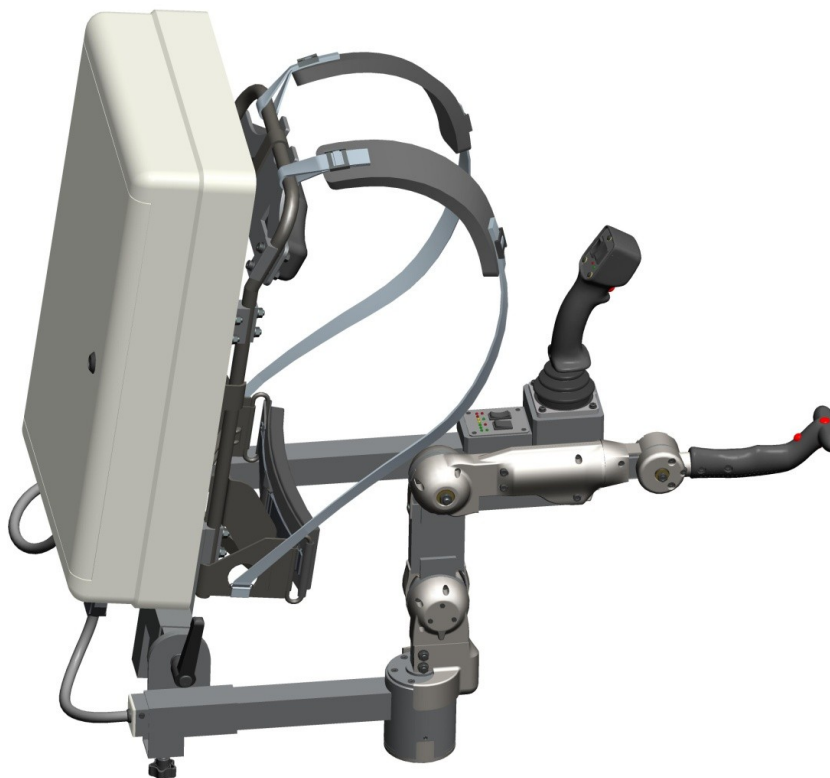
Byla provedena hodnotová analýza pomocí kritériálního hodnocení, kritéria byla vybrána odbornou rozpravou, jejich váha byla určena metodou porovnávání v trojúhelníku párů s lineární závislostí a jednotlivé varianty byly vyhodnoceny metodou PATTERN. Jako optimální varianta byla jednoznačně vybraná varianta číslo 1 díky své jednoduchosti, malé složitosti řízení a velké kompaktnosti. Ukázalo se, že právě celkový objem prostoru hraje klíčovou roli pro výběr. Přesto varianta 1 dominuje na čelních příčkách i u většiny jiných parametrů.

7 Popis optimální varianty

Zvolená optimální varianta byla dále konstrukčně rozpracovaná. Z důvodu lepší názornosti a komplexního řešení úlohy bude nejprve popsána konstrukce celého ovládacího batohu. Poté bude podrobně rozebráno technické řešení ovladače manipulačního ramene.

7.1 Mobilní ovládací batoh

Základem celé konstrukce je komerčně dostupný rám batohu A.L.I.C.E. (3) včetně popruhů a bederního pásu. Rám je vyroben z lehké hliníkové slitiny. Na něj je přišroubována základna s polohovacím systémem ramen. Systém má tři stupně volnosti. Dvě translace a jedna rotace umožňují nastavitelnost polohy obou ovladačů vůči operátorovi. Pro zajištění ramen jsou použity upínací páky GN 300 a utahovací kolečka VCT firmy Elesa Ganter (5). Ramena a většina polohovacího systému jsou odnímatelná. Díky tomu lze upevnit k operátorskému křeslu a ovládat robot z místa velitelského stanoviště. K rámu je připevněn elektrický rozvaděč, kde se nachází řídicí systém, výstražný systém a další nezbytná elektronika. Výstražný systém zvukovými signály operátora informuje o možném nebezpečí, pohybu mimo pracovní prostor robotu, slabé baterii apod. Kabeláž je s rozvaděčem propojena vhodným konektorem. Pro zvýšení komfortu při nošení je do horní oblasti přišroubována deska s vycpávkou. Celý ovladač, včetně obou ramen s ovladači, byl vymodelován v prostředí Pro Engineer a je zobrazen na obr. 7.1. Ovládací batoh s virtuálním demonstrantem je na obr. 7.2. Při tvorbě modelu bylo využito modulu Manikin programu Pro Engineer. Modely jsou k dispozici ve zvláštní příloze. Sestavný výkres, vytvořený v softwarovém prostředí AutoCAD, je v příloze bakalářské práce.



Obr. 7.1: Ovládací batoh mobilního robotu Hardy



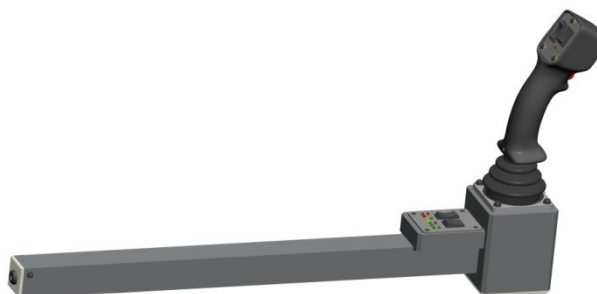
Obr. 7.2: Ovládací batoh s virtuálním demonstrantem

7.2 Ovládací rameno s joystickem

Ovládací rameno je tvořeno svařovanou konstrukcí rámu z hliníkové slitiny, kam je přišroubován joystick a ovládací panel. Na joysticku se nachází přepínač hasicí a uchopovací funkce efektoru s indikací zvoleného stavu, přídatnou osu pro ovládání šířky kužele hasicí kapaliny a akční tlačítko iniciující hasicí, popř. uchopovací funkci. Ovládací panel obsahuje přídatnou osu pro softwarové ovládání osy 1 manipulačního ramene. Důvodem je omezený rozsah pohybu ovladače tohoto ramene. Na panelu je také umístěna indikace stavu baterie pomocí barevných LED diod a volba typu uchopení. Efektor robotu Hardy má tři uchopovací prvky a je schopen automaticky měnit jejich polohu. V první poloze jsou dva uchopovací prvky umístěny proti třetímu a v druhé poloze všechny svírají úhel 120°. Pro ovládací rameno byl zvolen joystick ze série JS firmy Cyber Tech s rukojetí 8701-RB stejného výrobce. Technické údaje a cena joysticku, převzaté z katalogu firmy (4), jsou uvedeny v tab. 7.1. Rameno s joystickem je znázorněno na obr. 7.3.

Rozměry:	Φ 60,5 x 50,7 mm
Vstupní napětí:	2280 MPa
Výstupní napětí:	do 138° C
Cena:	\$ 874

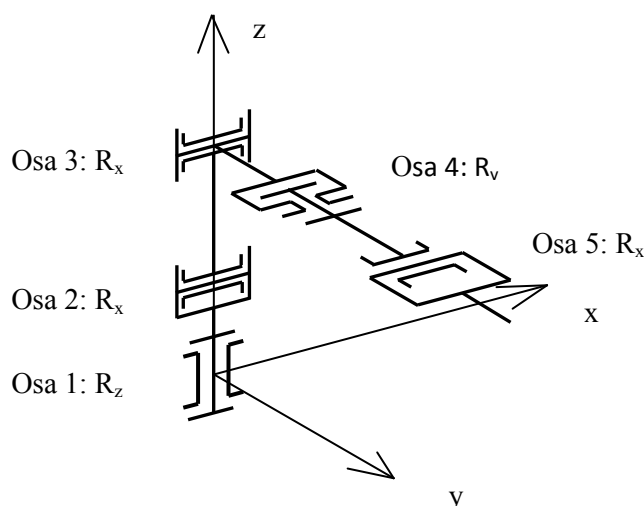
Tab. 7.1: Technické údaje a cena joysticku série JS



Obr. 7.3: Rameno s joystickem

7.3 Rameno s ovladačem manipulačního ramene robotu Hardy

Dané řešení, zvolené v hodnotové analýze, se dále konstrukčně propracovalo. Po upřesnění dříve neznámého pracovního prostoru robotu se pozměnila kinematická struktura tak, aby byla identická s hasicím robotem. Rozsahy pohybů, uvedené v tab. 7.2, tedy nejsou limitovány paralelogramem a orientace kloubů se nemusí vyrovnávat vůči ramenu 2. Dále tedy bude rozebráno konstrukční řešení bez tohoto prvku, které je však rozměrově větší, ale robustnější. Výsledná kinematická struktura je na obr. 7.4.



Obr. 7.4: Kinematická struktura ovladače manipulačního ramene

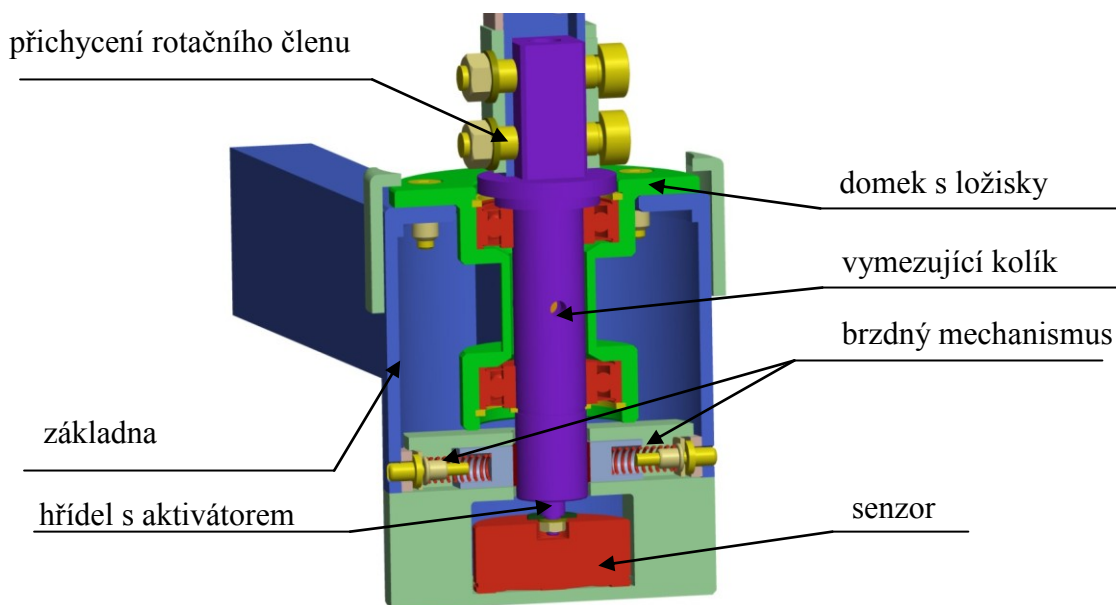
Kloub 1:	$\pm 120^\circ$ ($\pm 45^\circ$ na ovladači, zbytek se ovládá přídatnou osou na joysticku)
Kloub 2:	125°
Kloub 3:	155°
Kloub 4:	$\pm 180^\circ$
Kloub 5:	$\pm 100^\circ$

Tab. 7.2: Rozsahy pohybů v kloubech ovladače manipulačního ramene

7.3.1 Kloub 1

Kloub 1 zajišťuje vazbu mezi základnou a rotačním členem. Při návrhu kloubu byly uvažovány 2 varianty. Varianta 1 představuje řešení, kdy je na základnu připevněno ložisko se zkříženými válečky. Použitý typ ložiska je vybaven otvory pro upevnění hřídele i základny. Horní část hřídele má čtvercový průřez a dva otvory. Zde se nasune a následně zajistí rotační člen. Pro přesné spojení bez vůle jsou použity lícované šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Na spodní část hřídele přiléhají destičky brzdového mechanismu, jež jsou nalepeny na brzdých členech. Každý brzdý člen přitlačuje pružina. Síla pružiny se reguluje šroubem. Brzdy svírají navzájem úhel 180° a eliminují náhodný pohyb. Celý mechanismus je umístěn ve spodním krytu. Prostor pod brzdou vyplňuje senzor s aktivátorem. Pro vymezení rozsahu $\pm 45^\circ$ je do hřídele zašroubován kolík

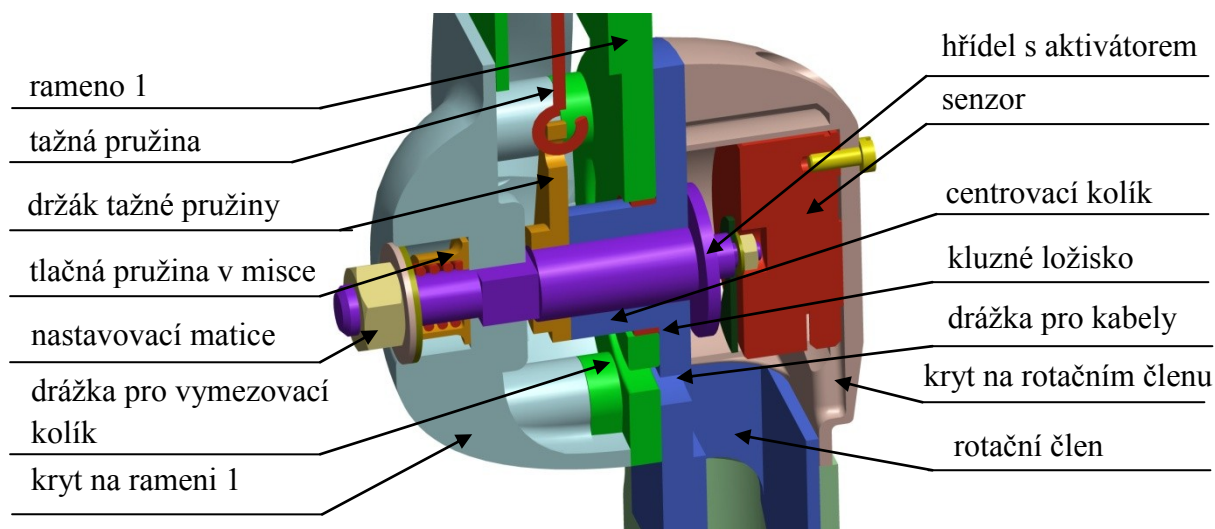
pohybující se v drážce ložiskového domku, která určuje dané meze. Podobný způsob konstrukčního řešení je využit i ve variantě 2 zobrazené na obr. 7.5. Rozdíl spočívá v použití dvou jednořadých kuličkových ložisek pro spojení hřídele se základnou. Ložiska jsou umístěná v domku našroubovaném na základně. První varianta nabízí především úsporu místa pro vedení kabelů. Nevýhodou je vysoká cena. Druhý způsob řešení je cenově úsporný, ale prostorově náročnější. Ve stejném vývojovém stádiu byla provedena hmotnostní analýza. Varianta 1 vážila 695 g a varianta 2 534 g. Z důvodu nižší hmotnosti a ceny byla použita varianta 2.



Obr. 7.5: Kloub 1, varianta 2

7.3.2 Kloub 2

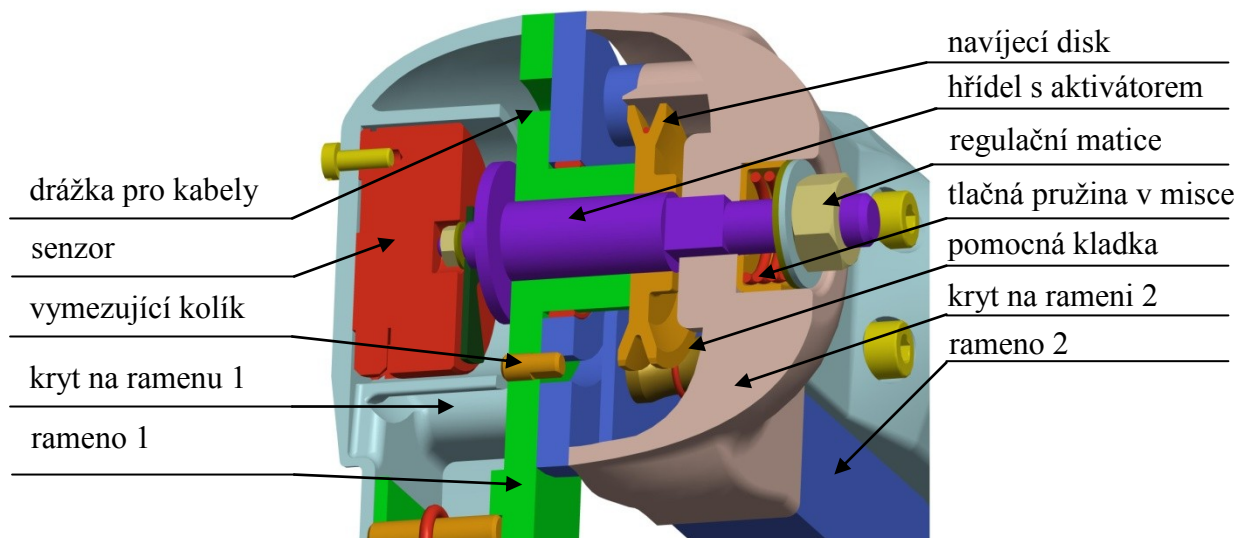
Vazbu mezi rotačním členem a ramenem 1 realizuje kloub 2. Řez kloubem je znázorněn na obr. 7.6. Tyto součásti se navzájem dotýkají třecími plochami. V třecí ploše rotačního členu je vyfrézována drážka pro průchod kabelů, vyvrtány otvory se závitem pro přichycení krytu a otvor pro nalisování kolíku vymezujícího pohyb ramene. Z plochy vystupuje centrovací kolík s drážkou pro držák pružiny a otvorem pro průchod čepu. Třecí plocha ramene 1 má otvor pro průchod kabelů, otvor pro centrovací kolík a drážku pro pohyb vymezujícího kolíku. Dále zde jsou 3 vyvýšené otvory se závitem pro připevnění krytu. Kluzné ložisko, umístěné mezi třecí plochou ramene 1 a centrovacím kolíkem, brání zadírání hliníkových ploch. Na centrovací kolík je nasunut držák tažné vyvažovací pružiny. Hřídel, umístěná do otvoru v třecí ploše rotačního členu, se otáčí spolu s ramenem 1 a slouží mimo jiné k přenášení rotačního pohybu k senzoru. Rotace se na hřídel přenáší přes plastový kryt, který má, stejně jako hřídel v místě styku, čtvercový průřez. Senzor je zašroubovaný v krytu kloubu na rotačním členu. Proti náhodné změně polohy zaviněné puštěním rukojeti je kloub vybaven vyvažovací tažnou pružinou a tlačnou pružinou. Tlačná pružina, umístěná v misce v krytu kloubu na rameni 1 je nastavitelná a vyvolává tření mezi třecími plochami.



Obr. 7.6: Konstrukce kloubu 2

7.3.3 Kloub 3

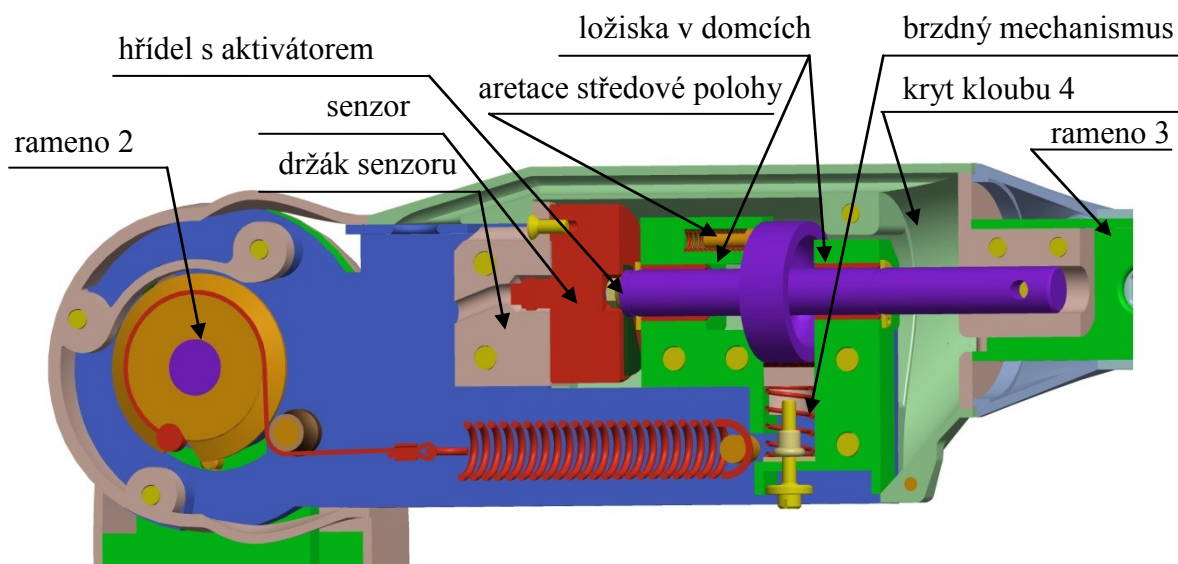
Rameno 1 a rameno 2 navzájem spojuje kloub 3, jehož řez je na obr. 7.7. Konstrukčně je kloub téměř totožný s kloubem 2. Proto zde budou uvedeny pouze rozdíly. Plastové kryty na obou stranách mají odlišně umístěné otvory pro přichycovací šrouby, což je dáno jednak počtem kabelů a také odlišným rozsahem pohybu. Kryt kloubu 2 na rameni 1 má delší přesah na povrchu ramene, neboť zabraňuje vypadnutí čepu tažné vyvažovací pružiny kloubu 1 a je zde umístěn otvor pro přichycovací šroub. Odlišný je také způsob vyvažování tažnou pružinou. Jelikož se rameno naklápí pouze na jednu stranu a pružina musí zabírat co nejmenší prostor, bylo zvoleno řešení, kdy se pružina nebude při natahování naklápět. Na disku, nasunutém do centrovacího kolíku třecí plochy ramene 1, je upevněno lanko, jež se při pohybu ramene 2 navíjí. Lanko vede přes pomocnou kladku až k pružině, kterou při navíjení natahuje. Čep pomocné kladky je proti vysunutí zajištěn plastovým krytem na rameni 2.



Obr. 7.7: Řez kloubem 3

7.3.4 Kloub 4

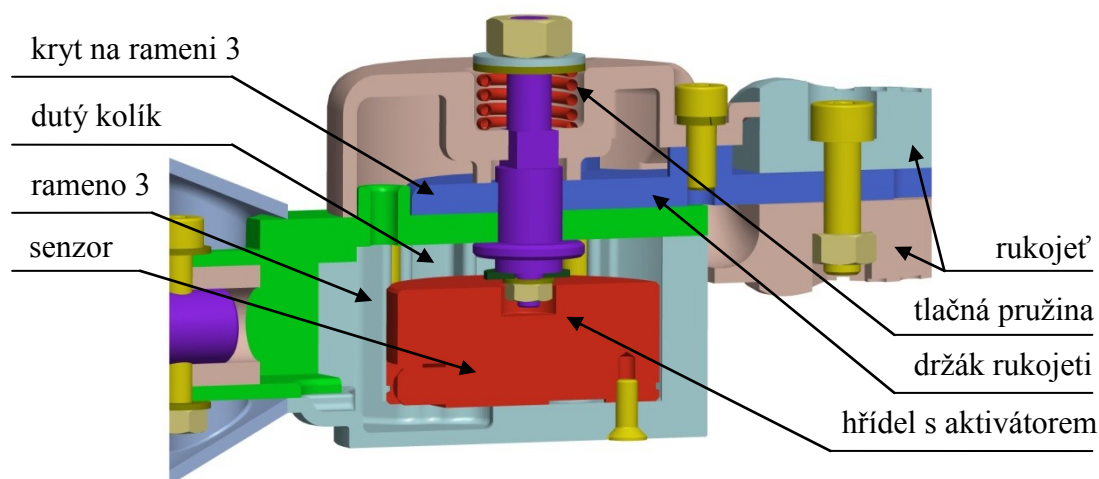
Kloub 4 spojuje rameno 2 a rameno 3, otáčející se okolo podélné osy ramene 2. Konstrukce kloubu 4, včetně brzdy, je umístěná do ramene 2 a je znázorněna na obr. 7.8. Senzor je našroubován do plastového držáku, samostatně upevněného do ramene 2. Aktivátor senzoru, připevněný na snímané hřídeli, se natáčí a poskytuje informaci o poloze. Hřídel je uložena ve dvou kluzných ložiscích. Každé ložisko má svůj domek. Kromě prostoru pro ložisko je na domcích uložen také systém pro aretaci středové polohy a brzda. Systém pro aretaci středové polohy se skládá z pružiny a kloboučku přitlačovaného na snímanou hřídel, kde ve středové poloze zapadá do důlku. Brzda se skládá z brzdového obložení nalepeného na přitlačnou desku, z tlačné pružiny, regulační matice a z regulačního šroubu. Brzda brání náhodnému pohybu při puštění rukojeti. Celý kloub je chráněn plastovým krytem, připevněným z obou stran na rameno 2. Na snímanou hřídel je nasunuto rameno 3 a proti pootočení zajištěno šroubem.



Obr. 7.8: Kloub 4

7.3.5 Kloub 5

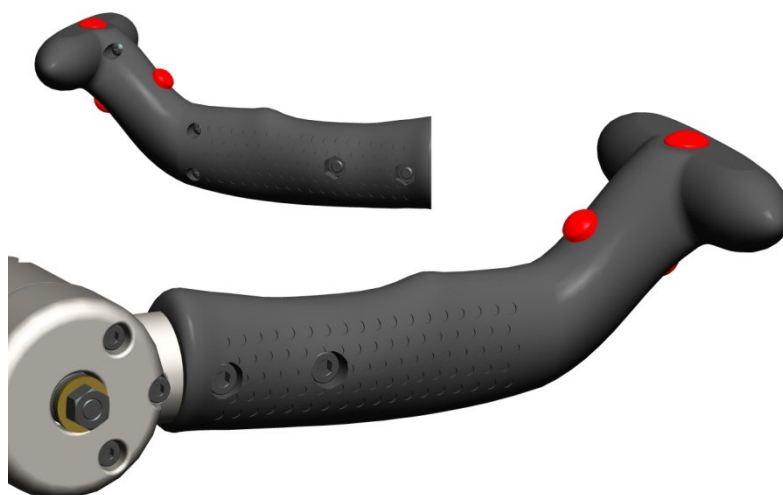
Naklápění rukojeti realizuje kloub 5, jenž spojuje rukojeť s ramenem 3. Kloub je zjednodušenou a zmenšenou verzí kloubů 2 a 3, chybí však zde vyvažování tažnou pružinou. Gravitační účinky jsou vyrovnávány pouze třením. Jádrem kloubu jsou 2 třecí desky, navzájem spojeny čepem s aktivátorem. Přitlačování desek zajišťuje tlačná pružina umístěná v plastovém krytu na držáku rukojeti. Přenos pohybu je, podobně jako u zmíněných kloubů přes plastový kryt s čtvercovým průřezem otvoru na čep s aktivátorem. Kloub je znázorněn na obr. 7.9.



Obr. 7.9: Kloub 5

7.3.6 Rukojeť

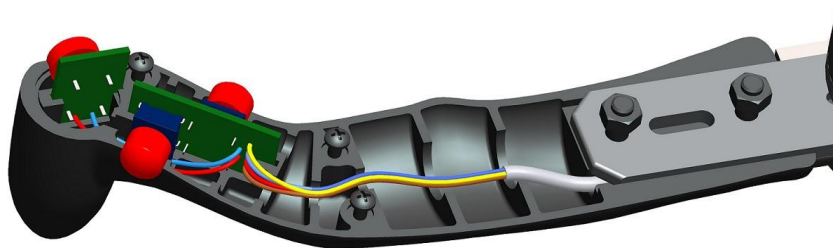
Speciálně tvarovaná, ergonomická rukojeť umožňuje nejen spolehlivý úchop, ale také snadnou montáž elektronických prvků. Tvar, zobrazený na obr. 7.10, vychází z prototypu vymodelovaného z plastelíny. Samotná rukojeť je vyrobena ze dvou polovin vzájemně sešroubovaných dohromady pomocí šroubů do plastu. Každá polovina je vyztužena žebry a z vnější strany má protiskluzový povrch. Dovnitř jsou zasunuty desky s mikrospínači. Rukojeť je připevněna k držáku pomocí dvou šroubů. Z hlediska řízení představuje koncový bod (efektor) robotu Hardy. Je vybavena třemi tlačítky – dvě tlačítka jsou tlačítka mrtvého muže a jedno tlačítko je akční (tj. funguje jako potvrzovací tlačítko pro akci vyvolanou na joysticku druhou rukou). Tlačítka mrtvého muže jsou další pojistkou proti nechtěnému pohybu ramen robotu v případě puštění rukojeti. Pro realizaci byly vybrány mikrospínače s krytím IP 65, charakterizované na internetových stránkách firmy GM Electronic (16). Jelikož je pracovní prostor robotu a ovladače velký, je rukojeť vybavena hrazdičkou. Díky tomu se může rukojeť uchopit více způsoby. Změnou uchopení je možno dosáhnout i takové pozice, jako je hašení za roh.



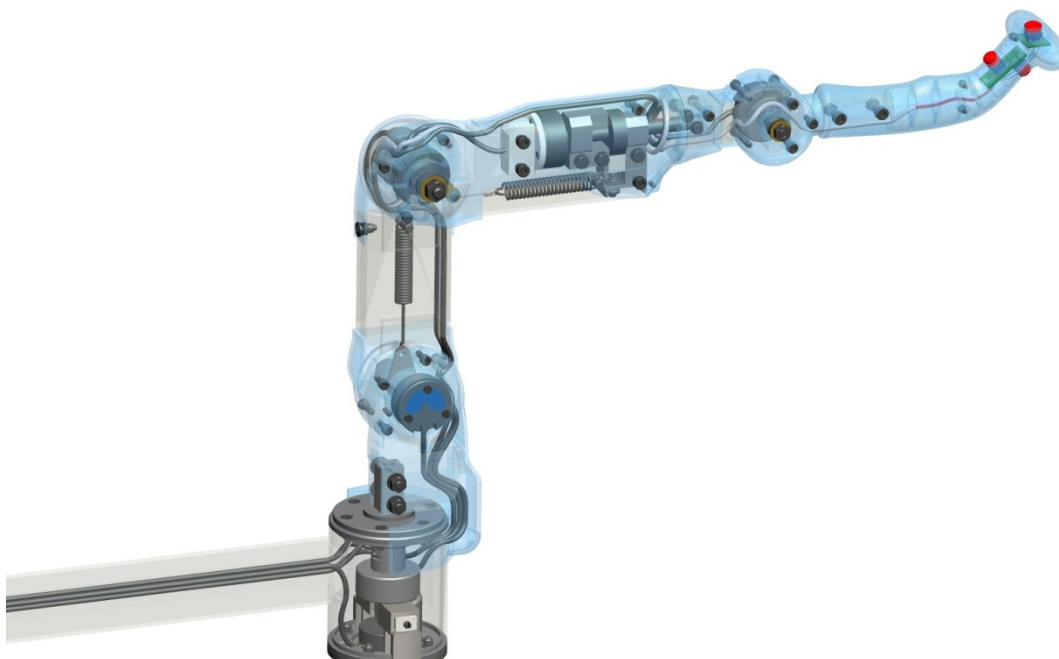
Obr. 7.10: Rukojeť ovladače

7.3.7 Vedení kabelů ovladačem

Kabely jsou vedeny uvnitř ovladače. Jejich umístění byla věnována náležitá pozornost a dbalo se především o to, aby pokud možno nezmenšovaly pohyblivost a rozsah pohybů ramen. Na obr. 7.11 je znázorněno vedení kabelů rukojeti ovladače. Průchod kabelů celým ovladačem je vyobrazen na obr. 7.12. Při tvorbě kabelů bylo využito modulu Cabling softwarového prostředí Pro Engineer. Pro tento účel byly kovové součásti na obr. 7.12 zprůhledněny. Průhledné jsou rovněž plastové součásti, které jsou zároveň označeny modrou barvou. V sestavě se vyskytují dva typy kabelů. Černě vyznačené kabely přenášejí informace ze senzorů a světlý kabel přenáší akce vyvolané stiskem tlačítek.



Obr. 7.11: Vedení kabelů z rukojeti



Obr. 7.12: Vedení kabelů modelem ovladače

V rukojeti jsou umístěny tištěné spoje s tlačítky. Ty jsou přes vhodný konektor spojeny s kabelem a vedou dále do kloubu 5. Procházejí kolem hřídele do dutého kolíku chránícího kabel proti přiskřípnutí a zároveň vymezujícího rozsah pohybu do ramene 3. V tomto místě se připojuje kabel ze senzoru kloubu 5. Další kabeláž ze senzorů se přidává

vždy v místě příslušného kloubu, a proto již nebude zvlášť zmiňována. Kabely procházejí spodní částí ramene, jsou omotány kolem snímané hřídele v prostoru mezi rameny a dále prochází tunelem v krytu kloubu 4. Pokračují v krytu kloubu 3 přes drážky v třecích plochách do ramene 1, kde jsou vedeny po okraji do krytu kloubu 1 a obdobně procházejí do rotačního členu. Z něj vedou přes speciálně tvarovaný kryt a drážku v základně do střední části ložiskového domku. Zde obcházejí ložiskový domek a vedou dále do čtyřhranné hliníkové trubky. Je důležité, aby hrany všech součástí byly v místě styku s kabely zaobleny.

7.4 Design ovladače

Při návrhu každé součásti byl, kromě funkčnosti, kladen velký důraz na design. Tuto potřebu ještě umocňuje skutečnost, že se bude robot Hardy zúčastňovat mezinárodních výstav a veletrhů. Tudíž je důležité, aby nejen robot, ale i ovladač vypadal reprezentativně. Díky výrobě krytů metodou Rapid Prototyping mohly být použity jinak neobvyklé tvary. Hlavní inspirací při navrhování součástí byla mořská fauna a flóra. Důležité také bylo, aby byl atraktivní nejen vzhled jednotlivých součástí, ale především celku. Pro ještě lepší výsledek je nutné součásti po vytištění vyleštit smirkovými papíry s vhodnými zrnitostmi.

Materiál pro výrobu kovového rámu je eloxovatelná slitina hliníku. Díky eloxaci je možno ještě zvýšit atraktivitu výrobku. Na obr. 7.13 je znázorněn návrh povrchové úpravy v kontextu s robotem Hardy. Součásti z hliníkové slitiny jsou eloxovány načerveno. V kombinaci s bílými vytištěnými součástmi se vytvoří žádoucí kontrast napodobující vzhled ovládaného robotu. Eloxací se rovněž zaručí ochrana slitiny před oxidací. Alternativou k tomuto procesu může být barevný komaxit identické barvy s robotem.



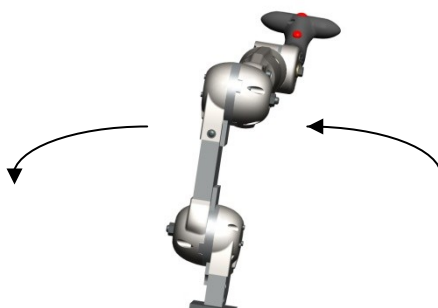
Obr. 7.13: Návrh barevné úpravy ovladače

8 Dimenzování a výběr tažných a tlačných pružin

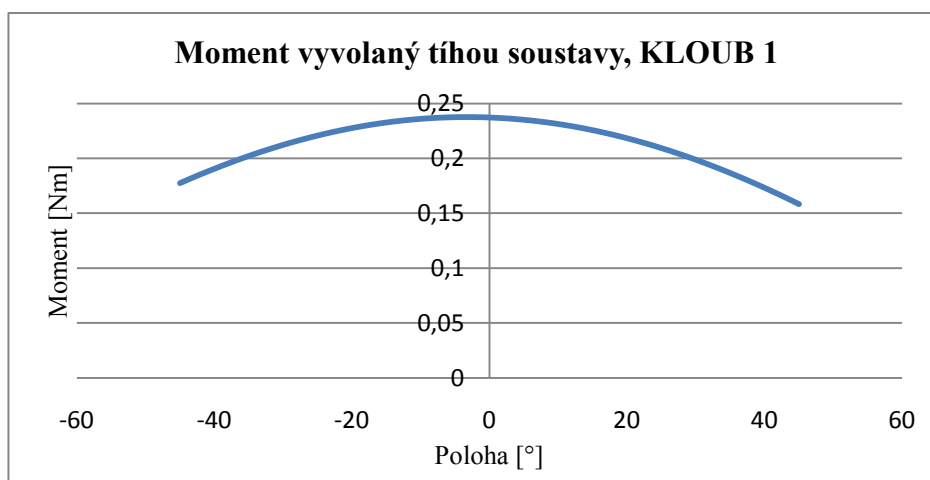
Pro správné vyvažování, stejně jako pro plynulé a lehké ovládání, je zapotřebí zvolit optimální pružiny. Při dimenzování byly použity dynamické analýzy modulu Mechanism softwarového prostředí Pro Engineer Wildfire 5. Pomocí těchto analýz jsou zjištěny průběhy momentů vyvolaných tíhou prvků soustavy. Konstrukcí soustavy je dáno rameno, na kterém bude tažná pružina tento moment vyvažovat. Při výpočtech pružin v kloubech 2 až 5 byla brána kritická situace, kdy je moment největší. Podle toho byla určena dráha pružiny a vypočtena potřebná tuhost. Následně byla z katalogu vybrána nejvhodnější varianta. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot je k dispozici ve zvláštní příloze.

8.1 Kloub 1

Při chůzi může dojít k náklonu celé soustavy. Bylo by nevhodné, kdyby se při každém náklonu ovladač kolébal ze strany na stranu. Proto je kloub 1 vybaven dvěma brzdami. Pro výpočet byla vymodelovaná nakloněná rovina se sklonem 8° . Ovladač byl usazen na tuto rovinu v základní poloze tak, že sklon roviny simuloval naklánění soustavy do boků při chůzi operátora. Situace, včetně směru provádění analýzy, je znázorněna na obr. 8.1. Ovladač se nachází ve středové poloze. Analýzou byl zjištěn průběh momentu vyvolaného tíhou soustavy v mezích pohybu kloubu 1. Výsledný průběh je možno vidět na obr. 8.2.

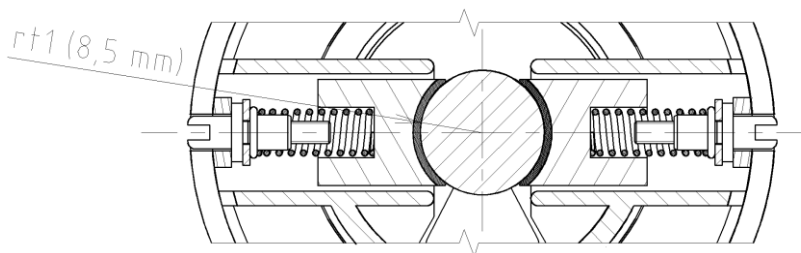


Obr. 8.1: Poloha a směr pohybu při analýze, kloub 1



Obr. 8.2: Průběh zátěžného momentu M_1 , kloub 1

Maximální moment M_{1max} je v krajních polohách a jeho velikost je 0,238 Nm. Tento moment bude eliminován dvěma brzdami. Třecí poloměr r_{t1} je 8,5 mm a je znázorněn na obr. 8.3.



Obr. 8.3: Znázornění třecího poloměru r_{t1}

Třecí koeficient f_1 byl převzat ze Strojnických tabulek (13) pro ferodo - ocel za pohybu a má hodnotu 0,5. Koeficient pro materiál ferodo – hliník nebyl nalezen. Potřebná třecí síla F_{t1} se vypočítá:

$$F_{t1} = \frac{M_{1max}}{r_{t1}} \quad (8.1)$$

$$F_{t1} = \frac{0,2380}{0,0085}$$

$$F_{t1} = 28 \text{ N.}$$

Síla jedné pružiny F_{p1} se vypočítá ze vztahu:

$$F_{t1} = 2 \times F_{p1} \times f_1 \quad (8.2)$$

$$F_{p1} = \frac{F_{t1}}{f_1 \times 2} \quad (8.3)$$

$$F_{p1} = \frac{28}{0,5 \times 2}$$

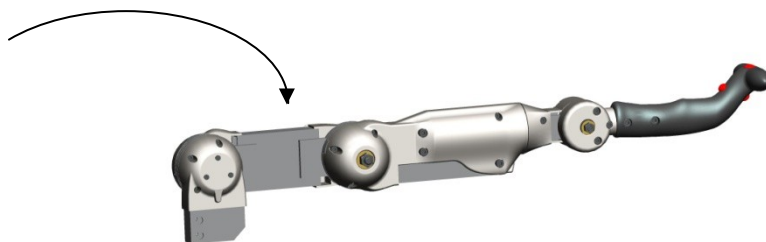
$$F_{p1} = 28 \text{ N.}$$

Výsledná síla jedné pružiny F_{p1} je tedy 28 N. Pro ovladač byla vybrána pružina D-132A-12 výrobce Gutekunst Federn (9), jež má maximální sílu 33 N a vyhovuje prostorovým požadavkům. Datový list pružiny je uveden v příloze C.

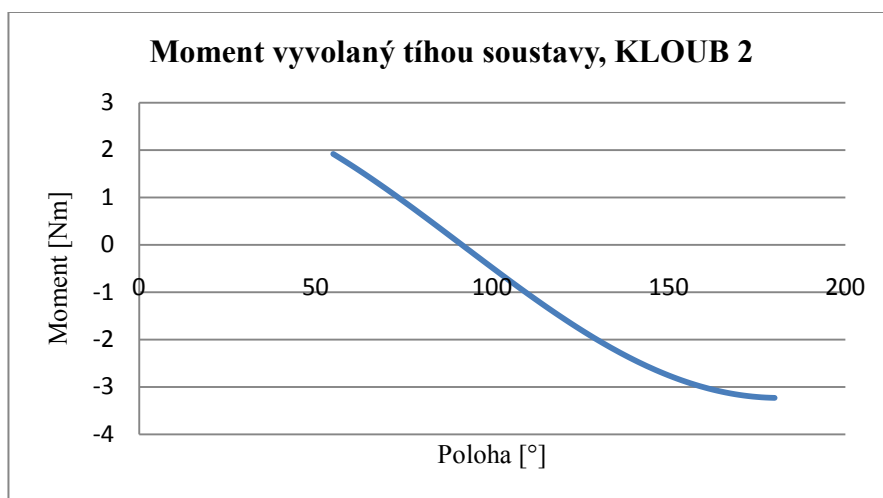
8.2 Kloub 2

Kloub 2 je nejnáročnější na vyvažování z hlediska působícího momentu. Proto je zde na vyvažování použita kombinace tažné a tlačné pružiny, kde tažná pružina eliminuje většinu zátěžového momentu a nastavitelná tlačná pružina zbytek. Na začátku byla provedena dynamická analýza zjišťující průběh momentu vyvolaného tíhou soustavy.

Poloha a pohyb soustavy je znázorněna na obr. 8.4. Celkový průběh zátěžného momentu M_2 je znázorněn na obr. 8.5.

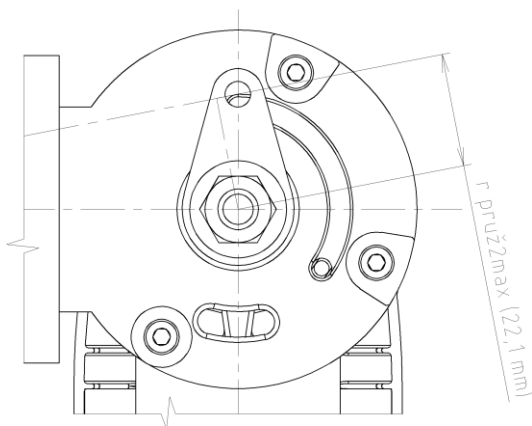


Obr. 8.4: Kritická poloha a směr pohybu při analýze, kloub 2



Obr. 8.5: Průběh zátěžného momentu, kloub 2

Maximální moment $M_{2\max}$ je 3,23 Nm. Jelikož parametry jako rameno, na němž působí síla pružiny $r_{\text{pruž2}}$ a délka pružiny $l_{\text{pruž2}}$ nejsou konstantní, bude zde proveden pouze výpočet kritické situace. Ostatní hodnoty jsou uvedeny v tabulce ve zvláštní příloze. Maximální rameno $r_{\text{pruž2max}}$ je 22,1 mm a je znázorněno na obr. 8.6.



Obr. 8.6: Znázornění ramene $r_{\text{pruž2max}}$

Odhadovaná síla pružiny tedy musí být:

$$F_{pruž2max} = \frac{M_{2max}}{r_{pruž2max}} \quad (8.4)$$

$$F_{pruž2max} = \frac{3,2300}{0,0221}$$

$$F_{pruž2max} = 146 \text{ N}.$$

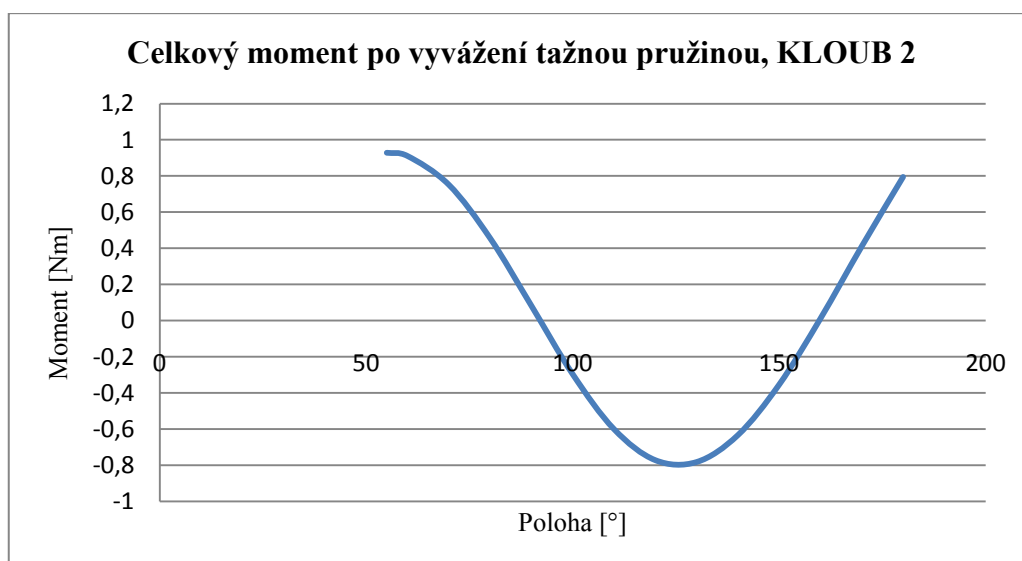
Z konstrukčních důvodů je dráha pružiny s_2 24,6 mm. Hodnota byla zjištěna rozměrovou analýzou v prostředí Pro Engineer. Předpokládaná tuhost pružiny k_2 tedy bude:

$$k_2 = \frac{F_{pruž2max}}{s_2} \quad (8.5)$$

$$k_2 = \frac{146}{24,6}$$

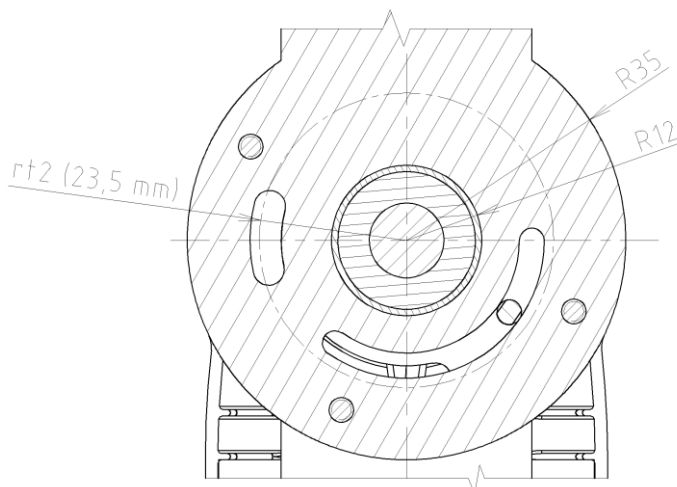
$$k_2 = 5,94 \text{ Nmm}^{-1}.$$

S ohledem na prostorové požadavky dané konstrukcí mechanismu je třeba zvolit pružinu s vnějším průměrem maximálně 14,5 mm a maximální délkou 88 mm s vhodnými konci a lineární charakteristikou. Pro zvýšení síly bude pružina předeptatá o 6 mm. Bylo experimentálně vyzkoušeno, že tato hodnota dosahuje nejlepších výsledků. Celkový moment v kloubu po vyvážení tažnou pružinou je součet obou momentů. Průběh celkového momentu v závislosti na poloze je znázorněn na obr. 8.7.



Obr. 8.7: Celkový moment po aplikaci tažné pružiny, kloub 2

Maximální zbytkový moment M_{2zbmax} je 0,93 Nm a musí se eliminovat tlačnou pružinou. Statický koeficient tření mezi suchými plochami z hliníkové slitiny f_2 je 0,42 (8). Třecí poloměr r_{t2} , zobrazený na obr. 8.8, je dán konstrukcí a má hodnotu 23,5 mm.



Obr. 8.8: Znázornění poloměru r_{t2}

Potřebná třecí síla F_{t2} se vypočítá:

$$F_{t2} = \frac{M_{2zbmax}}{r_{t2}} \quad (8.6)$$

$$F_{t2} = \frac{0,9300}{0,0235}$$

$$F_{t2} = 39,57 \text{ N.}$$

Síla pružiny F_{p2} se potom vypočítá ze vztahu:

$$F_{t2} = F_{p2} \times f_2 \quad (8.7)$$

$$F_{p2} = \frac{F_{t2}}{f_2} \quad (8.8)$$

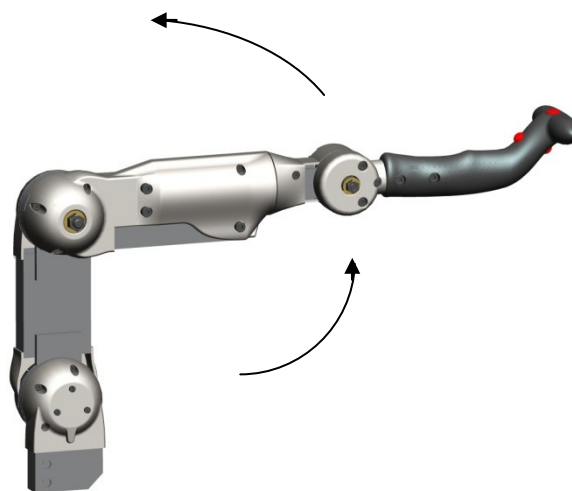
$$F_{p2} = \frac{39,57}{0,42}$$

$$F_{p2} = 94 \text{ N.}$$

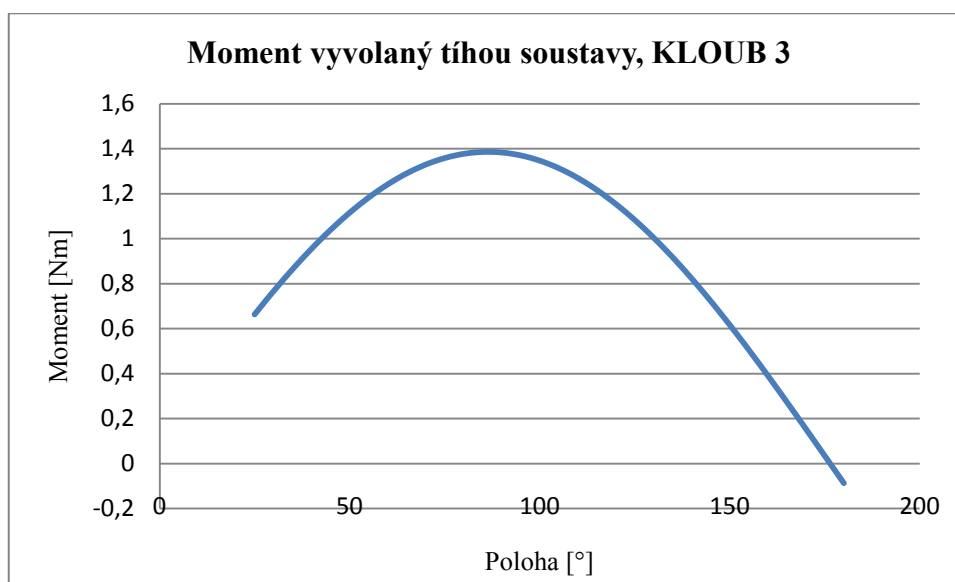
Výsledná síla tlačné pružiny F_{p2} je 94 N. S ohledem na sílu a prostorové požadavky byla vybrána pružina VD-222H výrobce Gutekunst Federn (9), která má max. sílu 140 N a tudíž je zde i rezerva. Datový list pružiny je k dispozici v příloze D.

8.3 Kloub 3

Silové zatížení kloubu 3 je také relativně velké, a proto je zde systém vyvažování opět tvořen kombinací tažné a tlačné pružiny. Na rozdíl od kloubu 2 je zde však systém kladek, jenž zaručuje síle pružiny konstantní rameno. Rozsah pohybu kloubu je velký, což může činit potíže při vyvažování. Pro přehlednost je zde uveden pouze výpočet kritického případu a průběhy momentu vzniklého tíhou soustavy a celkového momentu po vyvážení tažnou pružinou. Průběh momentu vzniklého tíhou soustavy byl zjištěn dynamickou analýzou. Kritická poloha ovladače při analýze a směr jeho pohybu je na obr. 8.9. Průběh momentu M_3 je zobrazen na obr. 8.10.

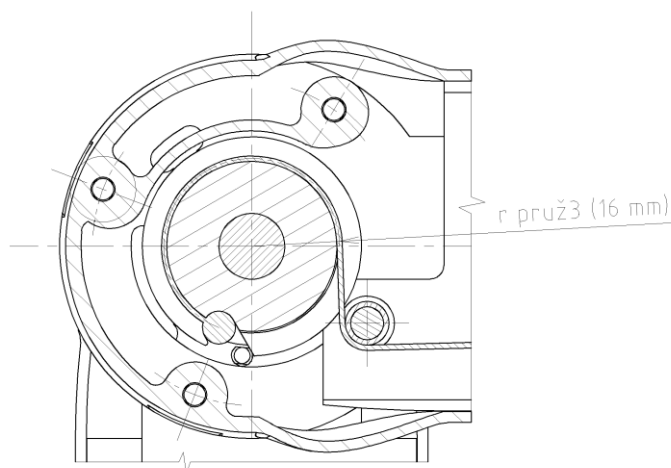


Obr. 8.9: Kritická poloha a směr pohybu při analýze, kloub 3



Obr. 8.10: Zátěžný moment M_3 , kloub 3

Maximální moment $M_{3\max}$ je přibližně v referenční poloze a jeho velikost je 1,385 Nm. Rameno, na kterém působí síla pružiny $r_{\text{pruž3}}$ o velikosti 16 mm je znázorněno na obr. 8.11.



Obr. 8.11: Znárodnění ramene $r_{pruž3}$

Síla pružiny $F_{pruž3max}$ v daném místě se vypočte ze vztahu:

$$F_{pruž3max} = \frac{M_{3max}}{r_{pruž3}} \quad (8.9)$$

$$F_{pruž3max} = \frac{1,385}{0,016}$$

$$F_{pruž3max} = 86,56 \text{ N}.$$

Předběžná tuhost pružiny k_3 se následně dopočítá podle vztahu:

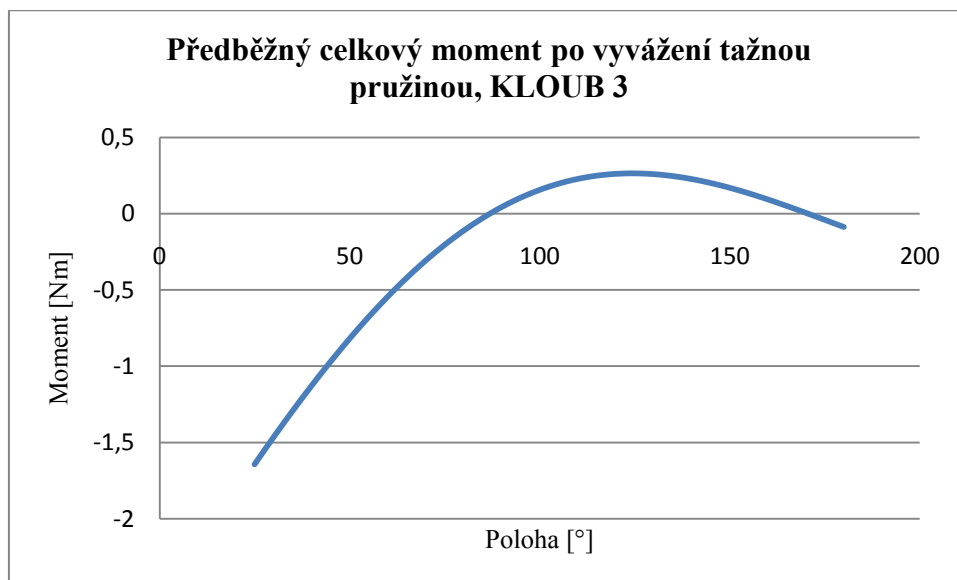
$$k_3 = \frac{F_{pruž3max}}{s_3} = \frac{F_{pruž3max}}{\left(\frac{2\pi r_{pruž3}}{360}\right) \times (180 - \varphi)}, \quad (8.10)$$

kde φ je aktuální poloha ramene 2 ve stupních – pro kritickou polohu má φ_{krit} velikost 87° . Následně se do vztahu dosadí známé hodnoty, přičemž velikost ramene zde bude v milimetrech:

$$k_3 = \frac{86,56}{\left(\frac{2\pi \times 16}{360}\right) \times (180 - 87)}$$

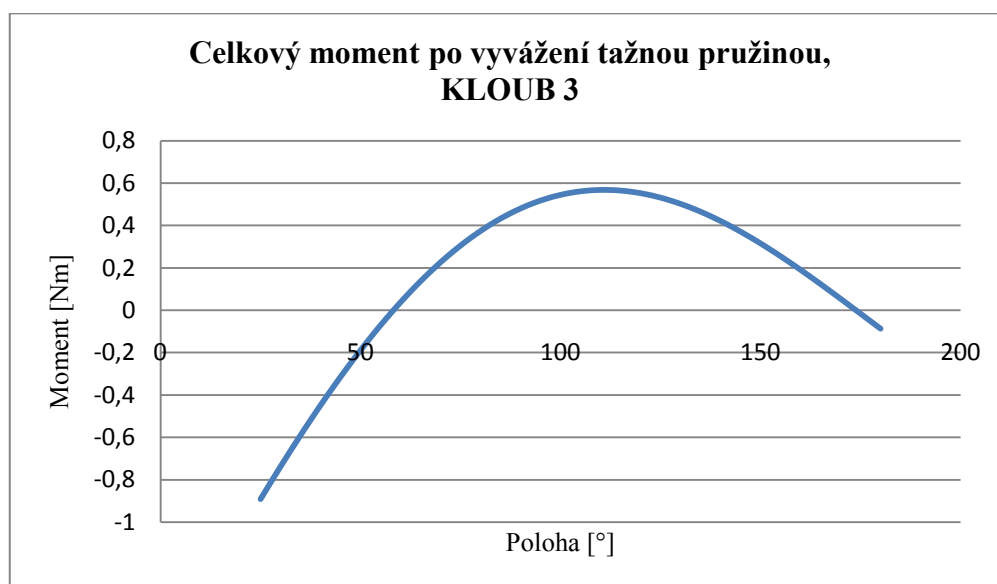
$$k_3 = 3,33 \text{ Nmm}^{-1}.$$

Předběžná tuhost pružiny má velikost $3,33 \text{ Nmm}^{-1}$. Předběžný celkový moment vytvořený součtem momentu vyvolaného tíhou a momentu vyvolaného tlačnou pružinou je na obr. 8.12.



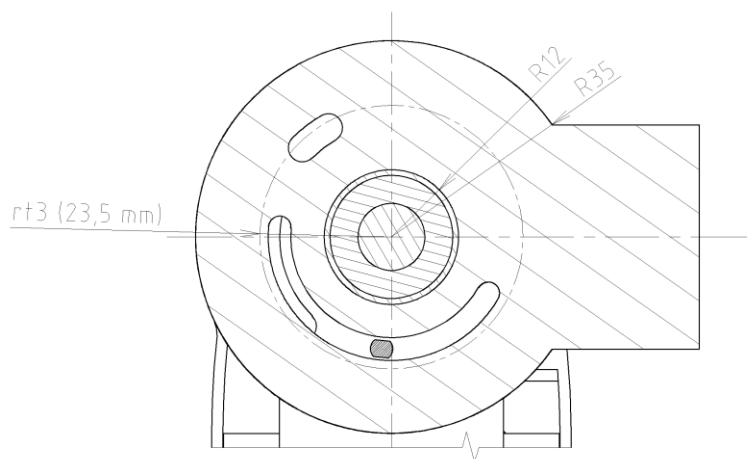
Obr. 8.12: Předběžný moment, kloub 3

Jak je z grafu patrné, pružina vyvažuje zátěž přibližně v rozmezí $60 - 180^\circ$. V tomto rozmezí by stačilo nastavit druhou, tlačnou pružinu tak, aby vytvářela třecí moment o velikosti $0,5 \text{ Nm}$. V rozmezí $25 - 60^\circ$ však síla pružiny natolik vzroste, že překoná tíhový moment i třecí moment a po puštění rukojeti v těchto polohách dojde ke zvednutí ramene 2. Je to dáno tím, že se pružina i po překonání kritické pozice stále napíná. Pro zmírnění tohoto efektu bylo experimentálně vyzkoušeno, že optimální tuhost je okolo hodnoty $2,244 \text{ Nmm}^{-1}$. Z konstrukčních důvodů musí být vybrána pružina s vnějším průměrem do $14,5 \text{ mm}$, délkou 50 mm a dráhou alespoň 44 mm . Průběh celkového momentu je vidět na obr. 8.13.



Obr. 8.13: Celkový moment, kloub 3

Maximální zbytkový moment M_{3zbmax} poklesl oproti předběžnému návrhu o cca 0,75 Nm na hodnotu 0,57 Nm. Zmenší se i maximální síla pružiny. Rameno 2 však bude mít tendenci se vracet pouze v rozmezí 25 – 30°, což je velký rozdíl oproti předběžnému výsledku. Tak, jako u předchozího kloubu, je statický koeficient tření mezi suchými plochami z hliníkové slitiny f_2 0,42 (8). Třecí poloměr r_{t3} , zobrazený na obr. 8.14, je dán konstrukcí a má hodnotu 23,5 mm.



Obr. 8.14: Znázornění ramene r_{t3}

Potřebná třecí síla F_{t3} se vypočítá:

$$F_{t3} = \frac{M_{3zbmax}}{r_{t3}} \quad (8.11)$$

$$F_{t3} = \frac{0,5700}{0,0235}$$

$$F_{t3} = 24,26 \text{ N.}$$

Síla pružiny F_{p3} se potom vypočítá ze vztahu:

$$F_{t3} = F_{p3} \times f_2 \quad (8.12)$$

$$F_{p3} = \frac{F_{t3}}{f_2} \quad (8.13)$$

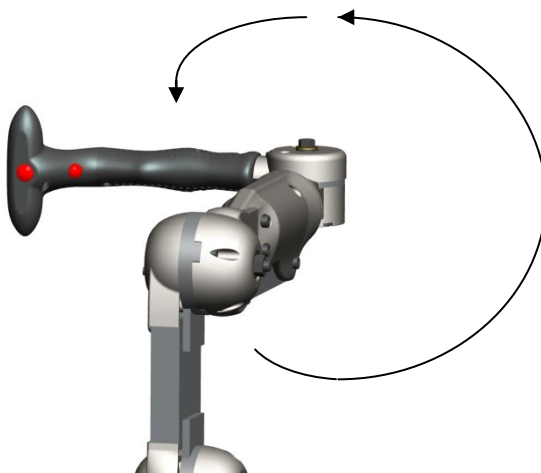
$$F_{p3} = \frac{24,26}{0,42}$$

$$F_{p3} = 57,76 \text{ N.}$$

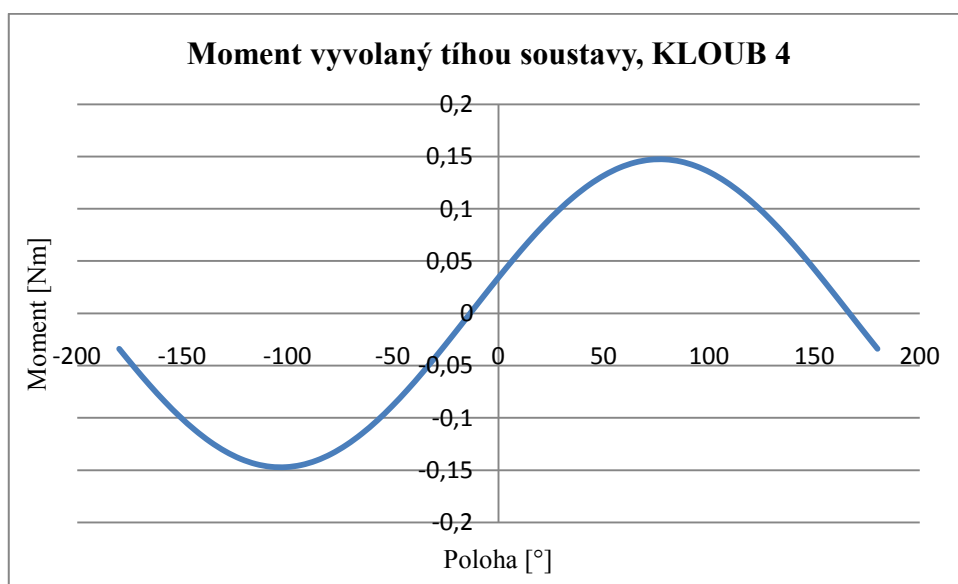
Výsledná síla tlačné pružiny F_{p3} je 57,76 N. S ohledem na sílu a prostorové požadavky byla vybrána pružina D-217A-10 výrobce Gutekunst Federn (9), která má max. sílu 81 N. Datový list pružiny je k dispozici v příloze E.

8.4 Kloub 4

Kloub 4 realizuje otáčení rukojeti kolem podélné osy robotu. Konstrukční řešení vyvažovacího systému je podobné jako u kloubu 1 – je zde použita brzda, přitlačovaná na otočnou hřídel tlačnou pružinou. Provedená dynamická analýza ukázala průběh momentu od vlastní tíhy. Kritická poloha a směr analýzy je znázorněn na obr. 8.15. Průběh momentu M_4 je zobrazený na obr. 8.16.

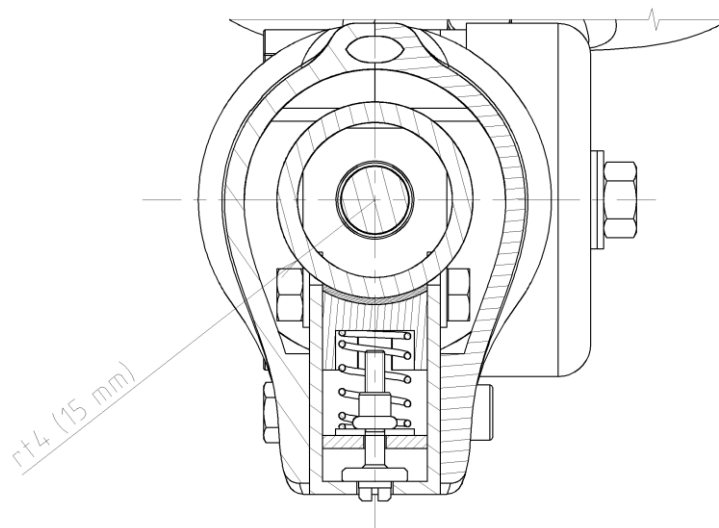


Obr. 8.15: Kritická poloha a směr pohybu při analýze, kloub 4



Obr. 8.16: Zátěžný moment M_4 , kloub 4

Maximální moment $M_{4\max}$, působící na kloub 4 díky gravitaci, je 0,147 Nm. Tento moment je již relativně malý a bude proto eliminován pouze třením vyvinutým působením tlačné pružiny. Rameno r_{t4} , na němž působí třecí síla, je znázorněno na obr 8.17 a má velikost 15 mm. Součinitel tření f_3 mezi ferodem a ocelí v klidu a za sucha je 0,55 (13).



Obr. 8.17: Znáznornění ramene r_{t4}

Potřebná třecí síla F_{t4} brzdné destičky se vypočte:

$$F_{t4} = \frac{M_{4max}}{r_{t4}} \quad (8.14)$$

$$F_{t4} = \frac{0,147}{0,015}$$

$$F_{t4} = 9,8 \text{ N.}$$

Z následujícího vztahu se dopočítá potřebná síla tlačné pružiny F_{p4} :

$$F_{t4} = F_{p4} \times f_3 \quad (8.15)$$

$$F_{p4} = \frac{F_{t4}}{f_3} \quad (8.16)$$

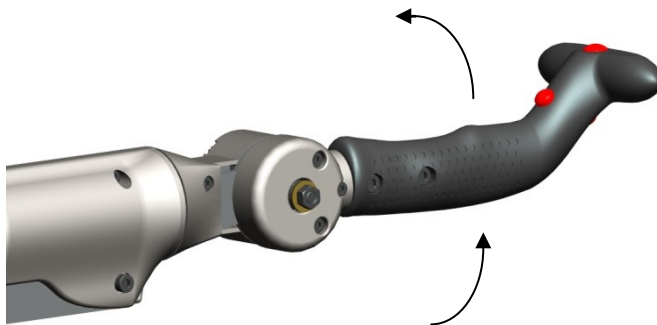
$$F_{p4} = \frac{9,8}{0,55}$$

$$F_{p4} = 17,82 \text{ N.}$$

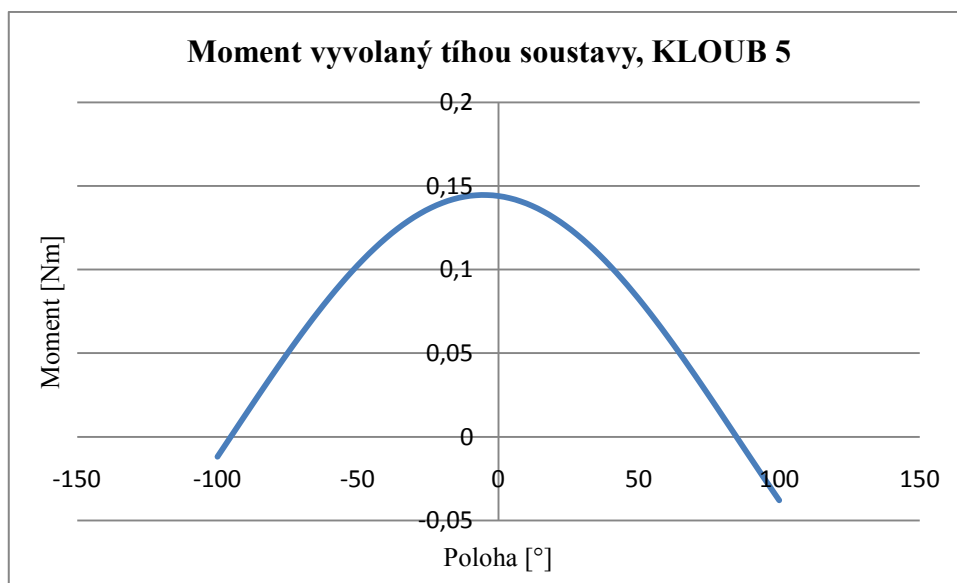
Vypočtená síla pružiny F_{p4} je 17,82 N. Z prostorových důvodů byla zvolena pružina D-151 výrobce Gutekunst Federn (9), jejíž maximální síla je 32 N. Poskytuje tedy dostatečnou rezervu pro seřizování. Datový list pružiny je uveden v příloze F.

8.5 Kloub 5

Kloub 5 umožňuje naklápění samotné rukojeti, což např. dovoluje hasit za roh. Umístění kloubu na konci ramene robotu klade nároky na malé rozměry a nízkou hmotnost. Díky relativně nízké hmotnosti rukojeti je i maximální zátěžový moment zjištěný dynamickou analýzou M_5 malý. Kritická poloha ovladače a směr průběhu analýzy znázorňuje obr. 8.18. Průběh momentu M_5 je znázorněn na obr. 8.19.

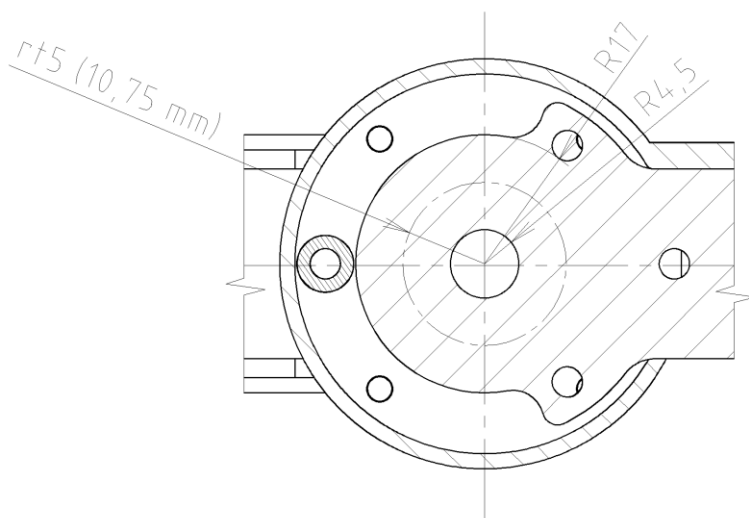


Obr. 8.18: Kritická poloha a směr pohybu při analýze, kloub 5



Obr. 8.19: Zátěžný moment M_5 , kloub 5

Maximální hodnota tohoto momentu $M_{5\max}$ je 0,145 Nm. Rameno r_{t5} , na němž působí třecí síla F_{t5} vyvolaná tlačnou pružinou, má velikost 10,75 mm a je zobrazeno na obr. 8.20. Koeficient tření f_2 mezi plochami z hliníkové slitiny je 0,42 (8).



Obr. 8.20: Znázornění ramene r_{t5}

Třecí síla F_{t5} se vypočítá:

$$F_{t5} = \frac{M_{5\max}}{r_{t5}} \quad (8.17)$$

$$F_{t5} = \frac{0,14500}{0,01075}$$

$$F_{t5} = 13,49 \text{ N}$$

Síla pružiny F_{p5} se dopočítá podle vztahu:

$$F_{t5} = F_{p5} \times f_2 \quad (8.18)$$

$$F_{p5} = \frac{F_{t5}}{f_2} \quad (8.19)$$

$$F_{p5} = \frac{13,49}{0,42}$$

$$F_{p5} = 32,12 \text{ N}$$

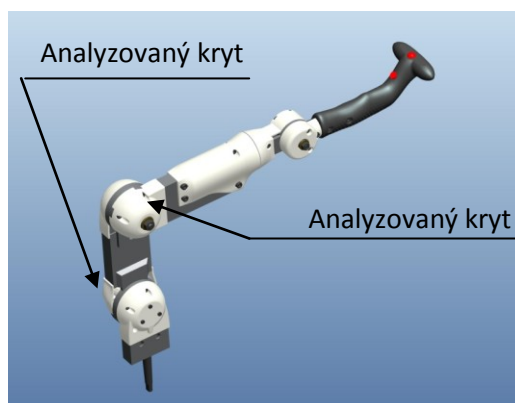
Vypočtená síla pružiny je 32,12 N. Z prostorových důvodů byla zvolena pružina D-180M-20 výrobce Gutekunst Federn (9), jejíž maximální síla je 40 N. Je zde tedy rezerva pro dodatečné seřízení. Technické údaje pružiny jsou k dispozici v datovém listu v příloze G.

9 Pevnostní analýza prototypu plastového krytu

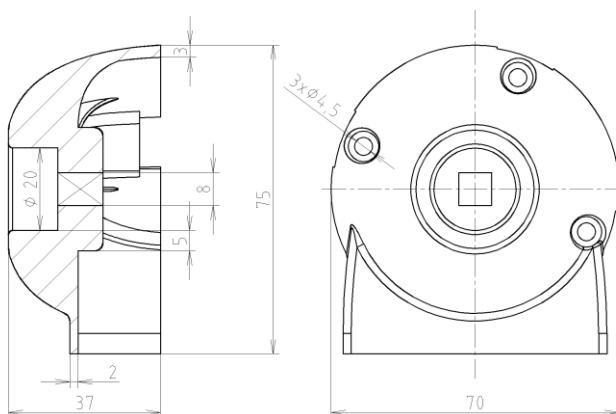
Pro ověření konstrukce byla kritická plastová součást podrobena pevnostní analýze pomocí metody konečných prvků. Zjišťovalo se ekvivalentní (von Misesovo) napětí a celková deformace součásti. Analýza byla prováděna v softwarovém prostředí Ansys Workbench. Soubor s analýzou a dosaženými výsledky je k dispozici ve zvláštní příloze.

9.1 Analyzovaná součást

Pro analýzu byl vybrán prototyp plastového krytu kloubů 2 a 3. Umístění krytu na ovladači je zobrazeno na obr. 9.1. Řez klouby a podrobný popis je uveden v kapitolách 7.3.2 a 7.3.3. Základní rozměry součásti jsou uvedeny na obr. 9.2. Plastový kryt plní estetickou, především však technologickou funkci. Čtvercovým otvorem prochází čep, jehož otáčení je zaznamenáváno senzorem v druhé polovině kloubu. Gravitační účinky vyrovnává tažná pružina. Zbytkové účinky jsou eliminovány třením mezi oběma polovinami kloubu. Velikost třecí síly je nastavitelná – maticí se utahuje druhá (tlačná) pružina, jež přitlačuje obě poloviny kloubu k sobě definovanou silou. Na plastový kryt bude tedy působit tato síla společně s axiální silou šroubů.



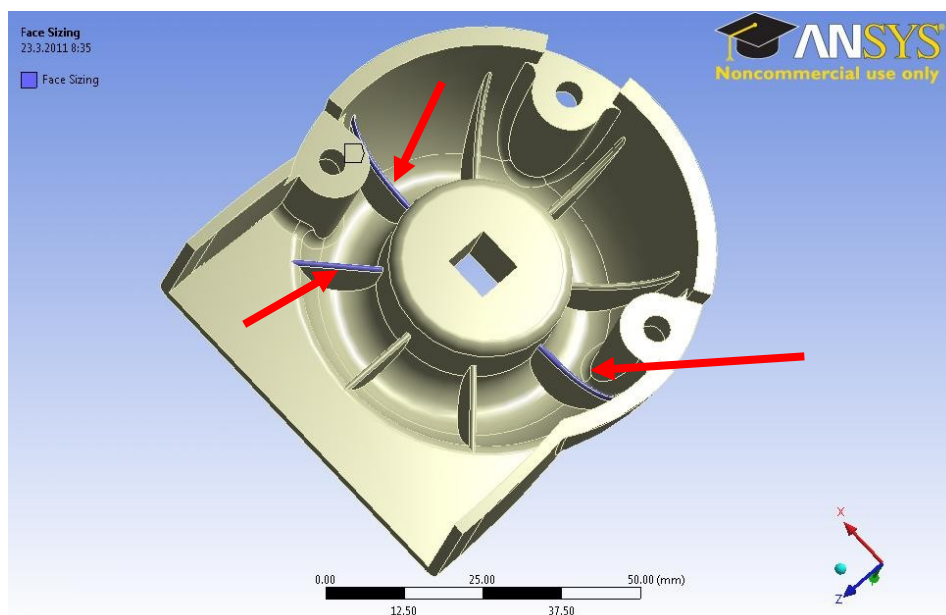
Obr. 9.1: Analyzovaný kryt v sestavě ovladače



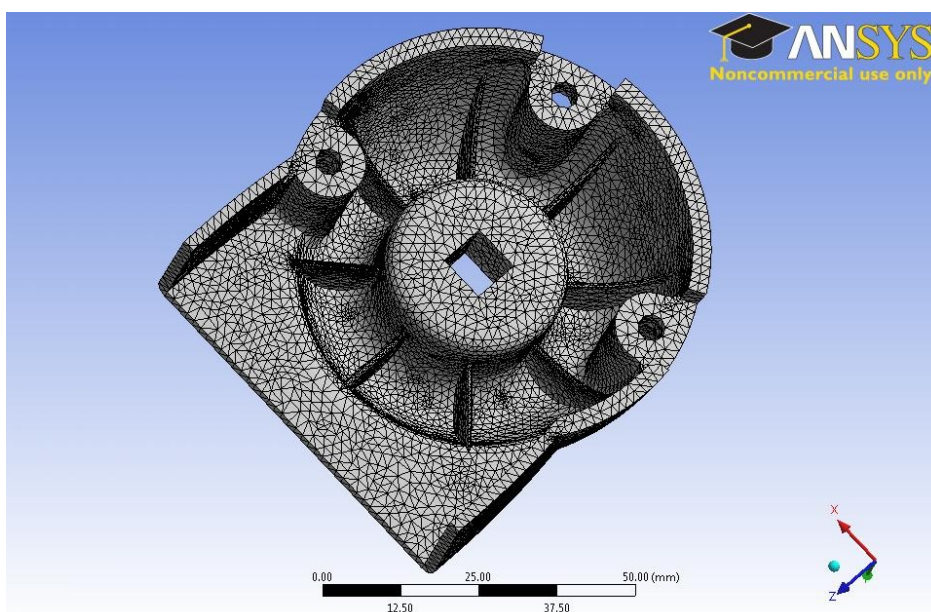
Obr. 9.2: Základní rozměry krytu (údaje v mm)

9.2 Síť

Síť pro výpočty metodou konečných prvků byla vygenerována automaticky, pro vyšší přesnost byla maximálně zjemněná (elementy byly co nejmenší). V místech s potenciálně nejvyššími hodnotami napětí a deformace se provedlo další zjemnění sítě pomocí funkce Face Sizing. Plochy, na které byla tato funkce aplikována, jsou znázorněny na obr. 9.3. Velikost elementů na zmíněných plochách byla nastavena na hodnotu 0,5 mm. Optimalizovaná síť má 197980 uzlů a 69891 prvků a je zobrazena na obr. 9.4.



Obr. 9.3: Plochy pro zjemnění sítě



Obr. 9.4: Výsledná optimalizovaná síť

9.3 Definice

Materiál

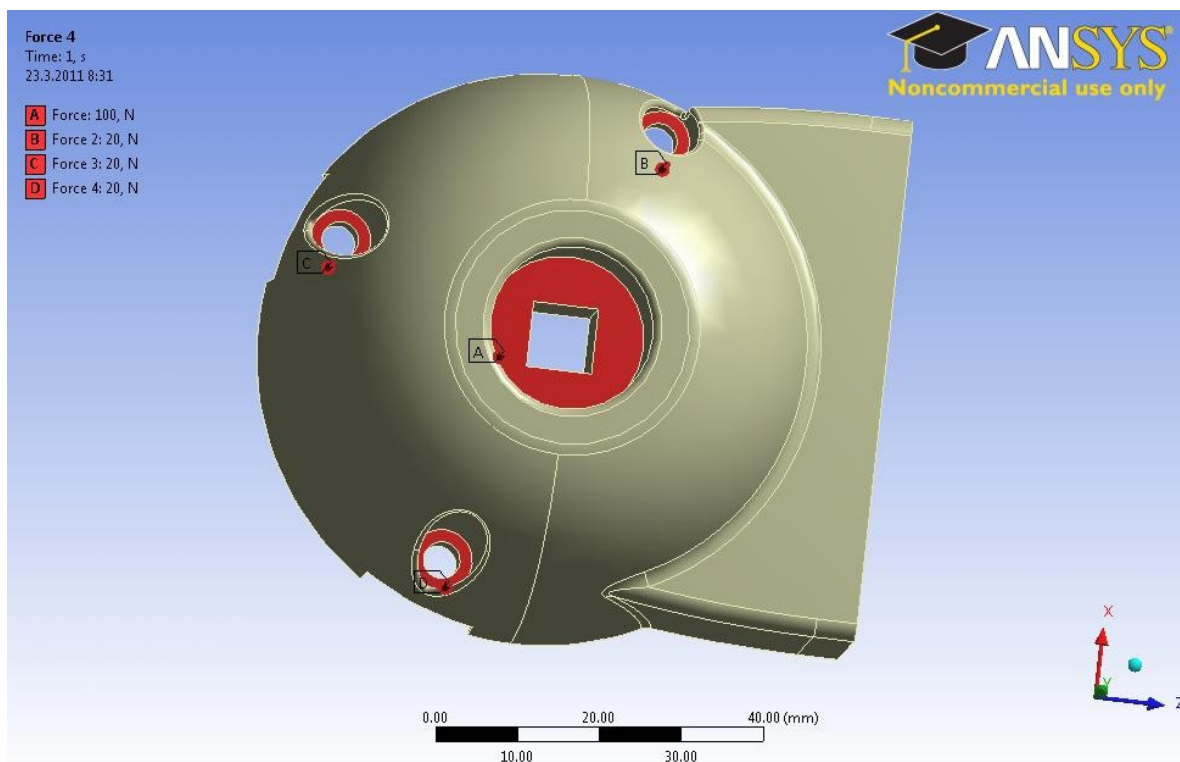
Součást bude vyrobena technologií 3D tisku z polykarbonátu. Pro zjišťování napětí a deformací v případě statické strukturální analýzy postačuje zadat Poissonovo číslo a modul pružnosti v tahu. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 9.1 (17).

Modul pružnosti v tahu:	2200 MPa
Poissonovo číslo:	0,37

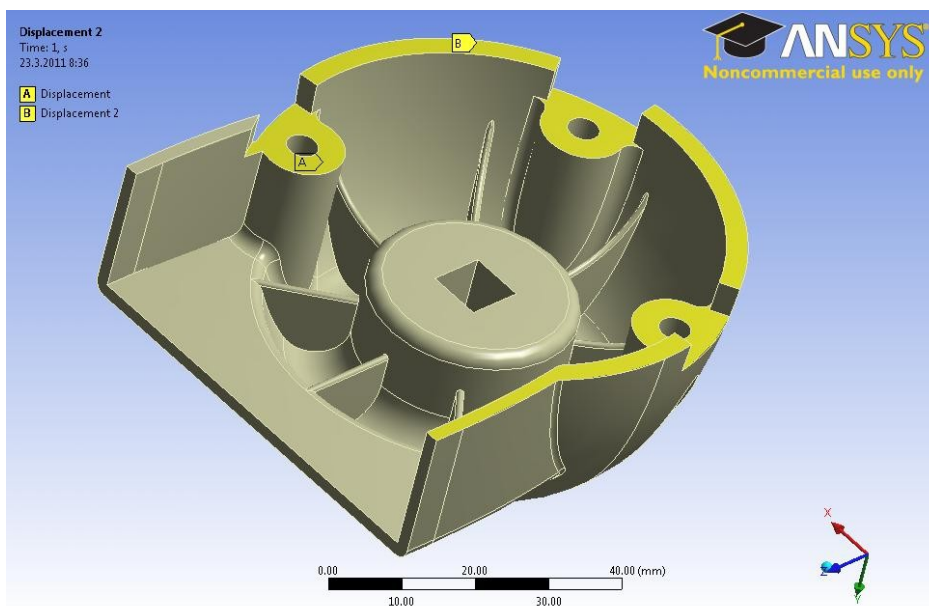
Tab. 9.1: Vlastnosti polykarbonátu potřebné pro analýzu

Okrajové podmínky

Na součást působí síly od pružiny znázorněné na obr. 9.5. Síla A je vyvolána tlačnou pružinou a její předběžná hodnota je 100 N. Působí v ose hlavního otvoru. Ostatní síly jsou vyvolány utažením šroubů a mají velikost 20 N. Působí v osách jednotlivých otvorů pro šrouby. Na obr. 9.6 jsou zobrazeny styčné plochy, kde se součást bude dotýkat hliníkového ramene, a tudíž je zde nastaveno zamezení proti posunutí v příslušné ose. Pro tuto podmínku byla použita funkce Displacement.



Obr. 9.5: Síly působící na objekt

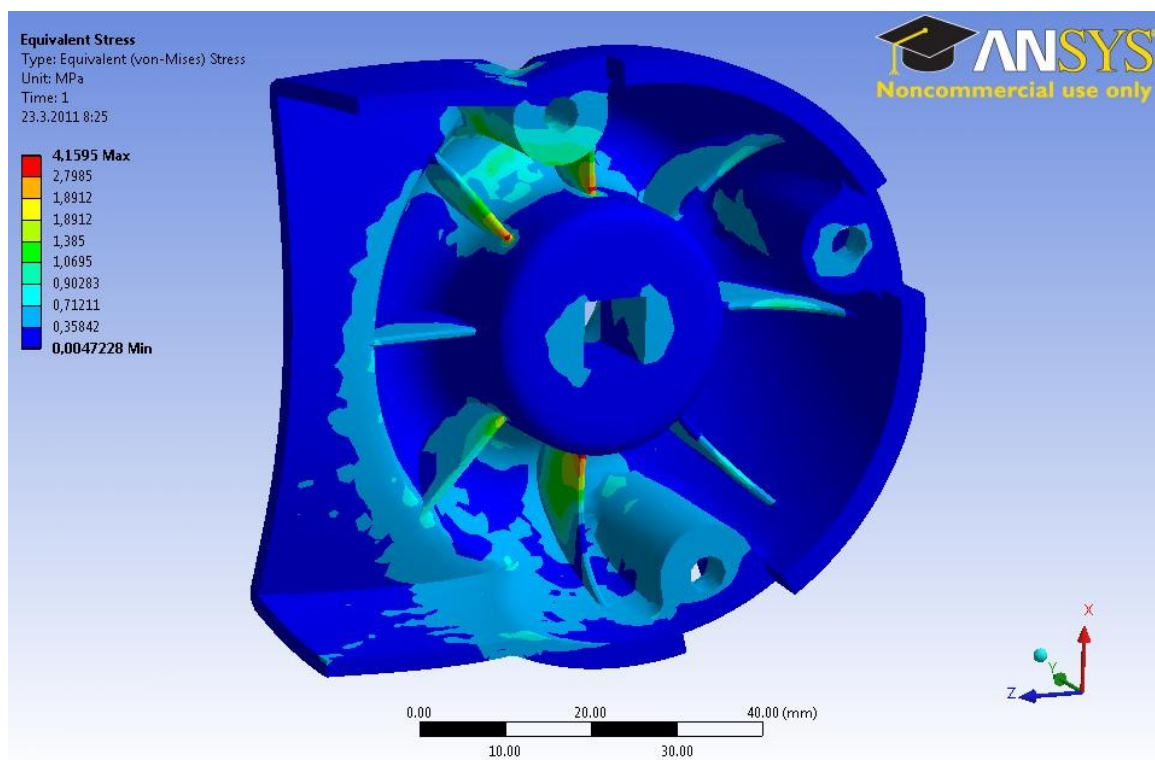


Obr. 9.6: Styčné plochy

9.4 Analýzy

Ekvivalentní (von Misesovo) napětí

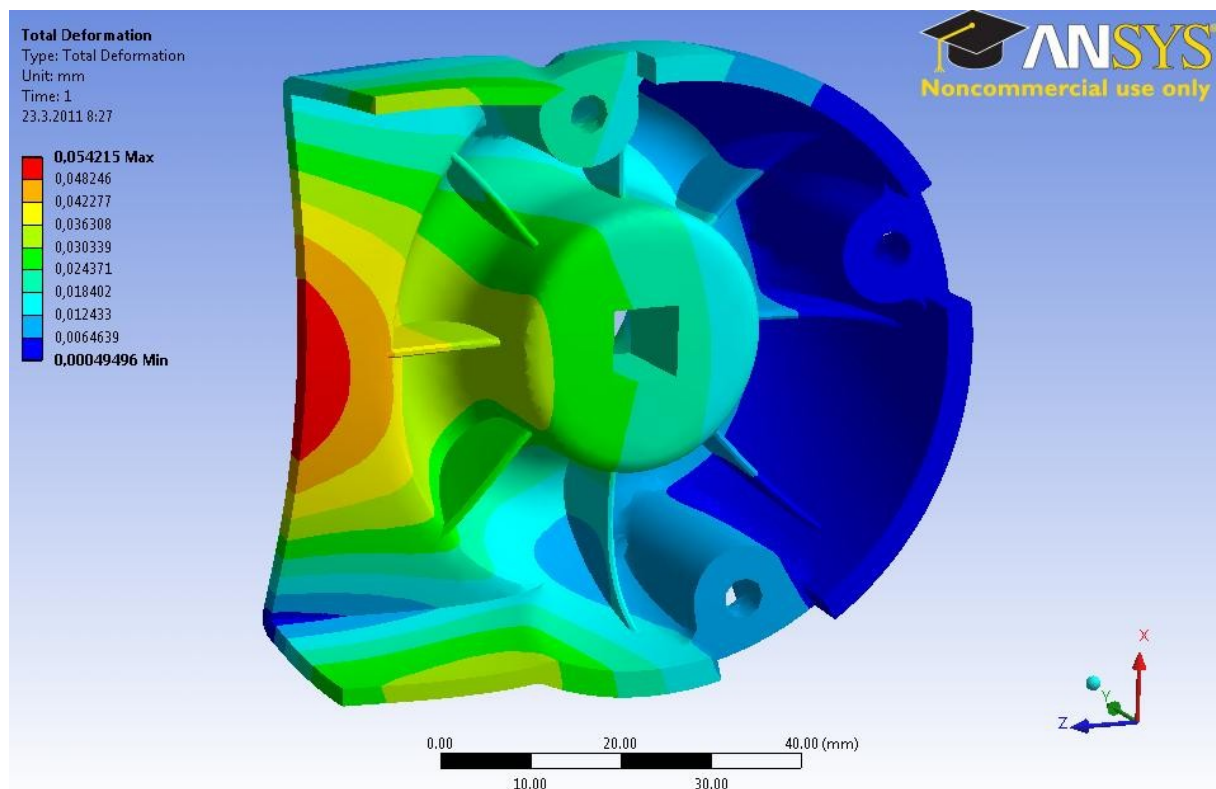
Byla provedena statická strukturální analýza typu Equivalent (von-Mises) Stress. Maximální zjištěné napětí podle této analýzy je 4,1595 MPa. Zjištěná mez kluzu v tlaku pro materiál polykarbonát je 80 MPa. Koeficient bezpečnosti je 19,3. Součást tedy vydrží dané zatížení. Na obr. 9.7 je zobrazena vizualizace napětí.



Obr. 9.7: Napětí součásti

Celková deformace

Byla provedena statická strukturální analýza typu Total Deformation. Maximální zjištěná hodnota deformace podle této analýzy je $5,422\text{e-}2$ mm. Celková deformace je tedy zanedbatelná. Vizualizace této analýzy je na obr. 9.8.



Obr. 9.8: Deformace součásti

9.5 Závěr pevnostní analýzy

Součást byla importována do softwarového prostředí Ansys Workbench, kde byla nadefinována a optimalizována síť a zadány okrajové podmínky. Poté byla podrobena statickým strukturálním analýzám zjišťujícím napětí a deformace. Analyzovaný kryt s velkou rezervou vyhovuje zadaným podmínkám.

10 Závěr

Byl proveden komplexní návrh ovládacího systému robotu Hardy včetně zařízení pro ovládání manipulačního ramene robotu. Z provedené rešerše dostupných haptických zařízení vyplynuly možné kinematické struktury ovladače a byly specifikovány další konstrukční a technické požadavky. Dále byla vypracována rešerše senzorického vybavení včetně hardware pro zpracování signálu ze snímačů. Z rešerše byl vybrán vhodný snímač, včetně převodníku jeho signálu do řídicího počítače.

Každá kinematická struktura se rozpracovala do formy jednoduchého 3D modelu, odkud byly zjištěny její technické vlastnosti. V průběhu práce na těchto variantách se ukázalo, že využití haptické technologie je nevhodné z důvodu vysoké cenové náročnosti a složitosti řízení. Jediná funkce, kterou by haptická technologie plnila, by bylo vyvažování gravitačních účinků působících na ovladač po puštění rukojeti. Varianty eliminovaly gravitační účinky třením. Pro výběr optimální varianty byla jednotlivá řešení porovnávána pomocí hodnotové analýzy.

Optimální varianta byla rozpracována až do podoby mobilního ovládacího batohu. Na batohu je umístěn joystick pro ovládání podvozku a některých funkcí efektoru, ovládací panel pro ovládání ostatních funkcí efektoru a ovladač manipulačního ramene robotu. Kinematická struktura ovladače je totožná se strukturou ramene robotu Hardy. Pro vyvažování gravitačních účinků ovladače byl zvolen systém tažných a tlačných pružin. Velká pozornost byla věnována také průchodu kabeláže jednotlivými klouby. Při návrhu všech částí se dbalo na celkový design.

Ve výpočtové části se definovaly požadavky na vyvažovací systém a byly vybrány vhodné pružiny a technické parametry. Tlačné pružiny vyvažovacího systému působí svou silou na některé plastové součásti. Proto byl prototyp zatěžované součásti podroben pevnostní analýze.

Výsledné zařízení se vyznačuje velkou názorností při ovládání, snadným řízením a atraktivním designem. Ve srovnání s haptickými ovladači má relativně nízkou hmotnost (2,4 Kg). Vyvažovací systém a konstrukce z hliníkové slitiny však zvětšily původně zamýšlené rozměry ovladače. Při výrobě klíčových prvků bude třeba kontrolovat kvalitu součástí a zvolit optimální technologii výroby. Zařízení je schopno téměř stoprocentně pokrýt rozsah manipulačního ramene robotu.

11 Použité zdroje

1. *5 DOF. Haptic Wand System – Systems and products – Quanser Industrial*
URL: <http://www.quanser.com/NET/Industrial/Systems_and_Products/Sys_5Dof_Haptic.aspx> [cit. 2010-09-29].
2. *Analogové měřicí karty pro PC - ELVAC IPC - průmyslové a speciální PC systémy.* URL: <<http://www.elvac.eu/ipc/chapter.asp?dept=201208&menu=20&supp=>> [cit. 2011-03-15].
3. *Batoh ALICE Pack Medium černý - Army Shop - Armyshop - Army-point.cz.* URL: <<http://www.armypoint.cz/batoh-alice-pack-medium-cerny/d-91252/>> [cit. 2011-03-30].
4. *Cyber-Tech Inc.* URL: <<http://www.cyber-tech.net/index.cfm>> [cit. 2011-04-15].
5. *E+G.* URL: <<http://www.elesa-ganter.com/cz/32/mnf2/produkty/eg/>> [cit. 2011-05-01].
6. *Encoders - From absolute to incremental and from ATEX to heavy duty.* URL: <<http://www.baumer.com/motion/en.html>> [cit. 2011-02-09].
7. *Force Dimension - Products.* URL: <<http://www.forcedimension.com/products>> [cit. 2010-09-29].
8. GALE, W. F. – TOTEMEIER, T. C. *Smithells Metals Reference Book*. 8th printing. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-7509-8.
9. *Gutekunst Federn – Váš specialista na pružiny.* URL <http://www.federnshop.com/Start_cz.html> [cit. 2011-03-15].
10. *Haptic devices - Sensable.* URL: <<http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>> [cit. 2010-09-28].
11. *Haption – the Virtuouse family.*
URL: <<http://www.haption.com/site/eng/html/materiel.php>> [cit. 2010-09-29].
12. *Industrial RS232 to RS485 Converter.* URL: <http://www.rs232-converters.com/RS232_to_RS485_Converters/Industrial_RS232_to_RS485_Converter.htm> [cit. 2011-03-15].
13. LEINVEBER, J. – VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.
14. *Nabídka služeb - Rapid Prototyping / Katedra robototechniky.*
URL: <<http://robot.vsb.cz/rapid-prototyping/>> [cit. 2010-10-14].
15. *Novint.* URL: <http://home.novint.com/products/novint_falcon.php> [cit. 2010-09-28].
16. *P-3ETL9 (630-260) - GM Electronic.* URL: <<http://www.gme.cz/cz/p-3etl9-p630-260.html>> [cit. 2011-02-26].
17. *Polycarbonate.* URL <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>> [cit. 2011-02-11].

18. *Potenciometry - GM Electronic*. URL: <<http://www.gme.cz/cz/elektronicke-soucastky/potenciometry/01006.html>> [cit. 2010-10-15].
19. *Převodník USB-RS485 vestavěný do USB konektoru*. URL: <<http://www.clexpert.cz/elektro/ftdi/prevodnik-usb-rs485.aspx>> [cit. 2011-03-10].
20. *Rotary sensors, 360° Rotary Sensor. Rotary Position Sensors*. URL: <<http://www.gillsensors.co.uk/content/rotary.htm>> [cit. 2011-02-20].
21. Shah, A. V. *How to Build an Inexpensive 5-DOF Haptic Device Using Two Novint Falcons* [online], 2010 [cit. 2010-09/30]. <http://www.telerobotics.utah.edu/uploads/Main/Shah_EuroHaptics10.pdf>.
22. SKAŘUPA, J. *Metodika konstruování*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 1993. 143 s., ISBN 80-7078-167-4.
23. *Tedia: Produkty*. URL: <<http://www.tedia.cz/produkty/index.html>> [cit. 2011-03-12].

12 Seznam příloh

Příloha	Obsah
A	Datový list senzoru Gill 360° Blade Rotary Sensor
B	Tabulka metody PATTERN hodnotové analýzy
C	Datový list tlačné pružiny D-132A-12
D	Datový list tlačné pružiny VD-222H
E	Datový list tlačné pružiny D-217A-10
F	Datový list tlačné pružiny D-151
G	Datový list tlačné pružiny D-180M-20
-	Sestavný výkres ovládacího batohu se seznamem položek
-	Sestavný výkres ovladače manipulačního ramene se seznamem položek

ZVLÁŠTNÍ PŘÍLOHA:

DVD s elektronickou verzí textu bakalářské práce včetně příloh, 3D modelem ovládacího batohu v prostředí Pro Engineer, tabulkou naměřených hodnot použitých při dimenzování pružin a analýzou plastového krytu v prostředí Ansys Workbench